

ЗМІСТ

Автоматизовані системи електричного транспорту

Щербак Я. В., Нерубацький В. П. Динамічний коефіцієнт передачі статичного перетворювача системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням	5
Гусевський Ю.І. , Лутай С.М., Мастепан А.Г. , Пашинська Ю.В. Дворівневий інвертор з покращеною формою вихідної напруги	12
Маслий Ар.С. , Маслий Ан.С. Исследование адекватности математической модели вентиляльно-индукторного двигателя	21
Ягуп Е. В. Расчет параметров устройства компенсации реактивной мощности сети электроснабжения с трансформатором на визуальной модели	25
Плахтий О. А. Динамическая модель активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности	33
Ienikieiev A.F. Computer implementation of the indirect method for estimating of the predicted microroughnesses	39
Семененко О.І., Семененко Ю.О. Підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму	47
Буряковский С.Г. Использование модального регулятора в системе управления электродвигателем стрелочного перевода	54
Aldona Kuśmińska-Fijałkowska, Mastepan A. Security robotic industrial processes	60
Супрун О.Д., Коваленко О.В. Дослідження перехідних режимів роботи установок гарантованого живлення блочно модульних тягових підстанцій	66
Баженов В.М., Одегов М.М. Швидкодіючий релейний захист вузлових схем живлення розподільних мереж	73
Яцько С.І., Ващенко Я.В. Система моніторингу стану асинхронного тягового електроприводу рухомого складу	79
Шпіка М. І. , Андрійченко В. П. , Герасименко В. А. Вдосконалення способу регулювання частоти обертання тягових двигунів постійного струму послідовного збудження	84
Шпіка М.І., Андрійченко В.П., Бесараб А.І. Покращення технічної ефективності та енергетичних показників системи тягового електроприводу трамвайного вагону	90
Ивакина Е.Я. Гармонический состав выходного напряжения выпрямителя с широтно – импульсной модуляцией	98
Акімов О.І., Сушко Д.Л., Панченко В.В., Стояновський Д.А. Вибір раціональної стратегії обслуговування електрообладнання	103
Щербак Я.В., Семененко Ю.О. Моделювання процесів роботи активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування	107
Щербак Я.В., Ивакина Е.Я., Панченко В.В. Фактор пульсаций системы автоматического регулирования с двухсторонней широтно-импульсной модуляцией	113

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Дешко В.І., Буяк Н.А. Вплив теплового захисту будівлі на показники теплового комфорту	121
Алексахин А.А. , Бобловский А.В. Оценка изменения характеристик микрорайонной тепловой сети при переходе к двухтрубной системе теплоснабжения с учетом возможного утепления зданий	128
Гапонова Л.В., Петрова Е.А. Оценка теплофизических характеристик трехслойных сэндвич-панелей серии «АЛЮТЕРМ»	132
Левенко Г. М. Визначення буферних властивостей пилювато-глинистих та	143

піщаних ґрунтів	
Лобяк О. В., Головка Д.В. Напружено-деформований та граничний стан сталобетонних пустотних плит	148
Волкова В. Е., Смолий И.С. Динамические характеристики уклонных пролетных строений конвейерных галерей	157
Оксак С. В. Вплив добавки полімерного латексу на фізико-механічні властивості бітуму та асфальтобетону	163
Грано Н. В. Развитие теоретических представлений о формировании первичной структуры грунтоматериалов в присутствии суперпластификатора	169
Удовенко В.О., Альошечкіна Т.М. До вопросу визначення нестационарного аеродинамічного навантаження від вітрового збудження, що діє на горизонтальну платформу	177
Орел Е.Ф., Ватуля Г.Л., Игнатенко А.В. Напряженно-деформированное состояние изотропных плит с симметричной поперечной неоднородностью при термосиловом нагружении	186
Павленко А.М. , Усенко Б.О. , Кошлак А.В. Енергозберігаючі технології формування об'ємних аморфних структур	192
<i>Теплові двигуни</i>	
Рубльов В.І., Білвол Г.В. Ексергетичний аналіз двигунів	203
Тимофеев С. С. Нанесение антифрикционного покрытия содержащего дисульфид молибдена	207
Фалендыш А. П., Пархоменко Л.А., Клецкая О.В., Рукавишников П.В. Целесообразность использования твердотопливных котлов на предприятиях железнодорожного транспорта	210
<i>Рухомий склад залізниць</i>	
Жалкін С. Г., Жалкін О. Д. Складеність дизель-поїздів приміського сполучення	218
Бабанін О. Б., Ломотько Д. В., Горобченко О. М. Синтез структури енергозберігаючої системи підтримки прийняття рішень для локомотивних бригад	226
Крашенінін О. С. Удосконалення підходів щодо коректування технології ТО, ПР локомотивів в після нормативний період експлуатації	232
Петухов В. М. Використання енергозберігаючих технологій при контролі буксових вузлів	238
Равлюк В. Г., Дерев'янчук Я. В. Обґрунтування доцільності розробки системи контролю гальм пасажирських вагонів	243
Бантюкова С. О. Аналіз основних аспектів управління ризиками виникнення порушень безпеки функціонування сортувальної гірки	251

УДК 621.333.41

ДИНАМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄНТ ПЕРЕДАЧІ СТАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ГАЛЬМУВАННЯМ

**Я. В. Щербак, д-р техн. наук,
В. П. Нерубацький, старш. викл.**

ДИНАМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ ПЕРЕДАЧИ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОРМОЖЕНИЕМ

**Я. В. Щербак, д-р техн. наук,
В. П. Нерубацький, старш. преп.**

DYNAMIC COEFFICIENT OF TRANSFER OF THE STATIC CONVERTER OF SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL BY ELECTRIC BRAKING

**Y. Shcherbak, doct. of techn. sciences,
V. Nerubatskyi, sen. lecturer**

У статті виконано аналіз і синтез динамічних процесів в системі автоматичного керування електричним гальмуванням. Одержані аналітичні залежності для фактора пульсацій, які дозволяють аналізувати вплив його змін на якість електричного гальмування. Показано, що в системі з тиристорним випрямлячем вплив змін режимів електричного гальмування на динамічні процеси є меншим чим в системі з широтно-імпульсним перетворювачем.

Ключові слова: Електричне гальмування, система автоматичного регулювання, фактор пульсацій, перетворювач.

В статье выполнен анализ и синтез динамических процессов в системе автоматического управления электрическим торможением. Получены аналитические зависимости для фактора пульсаций, которые позволяют анализировать влияние его изменений на качество электрического торможения. Показано, что в системе с тиристорным выпрямителем влияние изменений режимов электрического торможения на динамические процессы меньше чем в системе с широтно-импульсным преобразователем.

Ключевые слова: Электрическое торможение, система автоматического регулирования, фактор пульсаций, преобразователь.

The output tension of the operated rectifier or converter of constant tension incorporates the pulsation component. At turning on of such converters of electric energy in structure of the closed system of automatic control the pulsation component on a chain of feedback gets on a converter control system entrance. It causes at converters of change of coefficient of transfer. These dynamic changes can be considered a factor of pulsations. Nature of changes of a factor of pulsations and its size depends on properties of system of automatic control. Receiving expression for a factor of pulsations is connected with receiving left-side value of the derivative given continuous part of system of regulation concerning the switching moments in the converter.

In article the analysis and synthesis of dynamic processes in system of automatic control of electric braking is made. Analytical dependences for a factor of pulsations which allow to analyze influence of its changes on quality of electric braking are received. It is shown that in system with the thyristor rectifier influence of changes of the modes of electric braking on dynamic processes is less than in system with the pulse-width converter.

Keywords: Electric braking, system of automatic control, factor of pulsations, converter.

Вступ.

У відомих роботах аналіз динамічних характеристик виконаний при представленні перетворювача у вигляді безперервної ланки. Облік дискретності перетворювача дозволяє отримати граничну швидкодію в системі з урахуванням впливу на перехідні процеси пульсаційної складової, що міститься в регульованій координаті системи. Даний підхід покладений в основу дослідження динамічних процесів в системі автоматичного керування електричним гальмуванням, викладеного в даній роботі.

1. Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.

Вихідна напруга керованого випрямляча або перетворювача постійної напруги в своєму складі має пульсаційну складову [1]. При включенні таких перетворювачів електричної енергії до складу замкнутої системи автоматичного регулювання пульсаційна складова по колу зворотного зв'язку попадає на вхід системи та дослідження його впливу на динамічні процеси.

3. Основна частина дослідження.

Для визначення фактора пульсацій в режимі неперервного струму в колі навантаження перетворювача розглянемо наведену на рис. 1 структурну схему. На

керування перетворювача. Це викликає в перетворювачі зміни коефіцієнта передачі. Ці динамічні зміни прийнято враховувати фактором пульсацій [2].

Характер змін фактора пульсацій та його величина залежить від властивостей системи автоматичного регулювання. Одержання виразу для фактора пульсацій пов'язано з одержанням лівостороннього значення похідної приведенної неперервної частини системи регулювання відносно моментів переключення в перетворювачі.

Для складної передавальної функції приведенної неперервної частини це є достатньо складним завданням [3, 4]. Із цього витікає, що дослідження фактора пульсацій і його впливу на систему автоматичного регулювання є актуальною задачею.

2. Визначення мети та задачі дослідження.

Мета даної роботи – одержання виразу для фактора пульсацій системи автоматичного регулювання струму тягового двигуна при електричному гальмуванні структурній схемі зроблені наступні позначення: K_n – статичний коефіцієнт передачі перетворювача; F – фактор пульсацій; T – період дискретності перетворювача; $W(p)$ – передавальна функція неперервної частини.

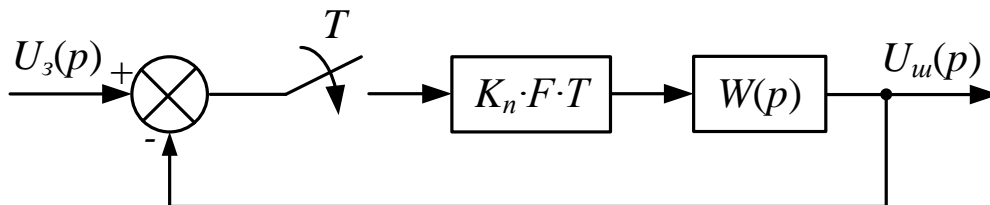


Рис. 1. Узагальнена структурна схема системи автоматичного регулювання струму

В [5] синтезовано передавальну функцію приведенної неперервної частини системи автоматичного регулювання струму

тягового двигуна в режимі електричного гальмування, яка відповідає умовам процесу кінцевої тривалості

$$W(p) = K_n \cdot K_0 \cdot \left[\frac{K_1}{T_C \cdot p + 1} + K_2 \cdot \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_1 \cdot p \cdot (T_H \cdot p + 1) \cdot (T_C \cdot p + 1)} \right], \quad (1)$$

де K_n – статичний коефіцієнт передачі перетворювача; K_0, K_1, K_2 – статичні коефіцієнти передачі динамічних ланок системи автоматичного регулювання. Загальний вираз для визначення фактора пульсацій має вигляд [2]

$$F^{-1} = 1 - \frac{dU_y(t)/dt}{dU_{on}(t)/dt} \Big|_{t=nT-0}, \quad (2)$$

де $U_y(t)$ та $U_{on}(t)$ – вхідний і опорний сигнали системи керування. представити у вигляді суми n - аперіодичних ланок зі сталими часу T_i та коефіцієнтами передачі K_i

Відомо, що передавальну функцію приведеної неперервної частини системи на основі теореми розкладу [6] можна

$$W(p) = \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{T_i \cdot p + 1}. \quad (3)$$

В системах електричного гальмування для регулювання струму збудження тягового двигуна застосовують тиристорний випрямляч або широтно-імпульсний перетворювач [7].

Згідно з [8] фактор пульсацій в системі регулювання з узагальненою аперіодичною ланкою (3) і тиристорним випрямлячем з аркосинусоїдальним опорним сигналом в системі імпульсно-фазового керування визначається виразом

$$F_i^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{2 \cdot T_i} + \frac{K_i \cdot (\omega_0 \cdot T_i \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1)}{1 + (\omega_0 \cdot T_i)^2} \cdot \left(\frac{T}{2 \cdot T_i} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_i} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right), \quad (4)$$

де α_0 – кут керування; m – пульсність випрямляча; ω_0 – кругова частота живильної мережі. Для системи регулювання з широтно-імпульсним перетворювачем з односторонньою модуляцією [9]

$$F_i^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{T_i} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_i}} - e^{-\frac{T}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}}, \quad (5)$$

де γ – відносна тривалість вихідного імпульсу перетворювача. двосторонньою модуляцією [10] на інтервалі дії вихідного імпульсу

Для системи регулювання з широтно-імпульсним перетворювачем з

$$F_{i1}^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{2 \cdot T_i} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_i}} - e^{-\frac{T}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}}, \quad (6)$$

на інтервалі паузи

$$F_{i2}^{-1} = 1 + \frac{T \cdot K_i}{2 \cdot T_i} \cdot \frac{e^{-(1-\gamma) \frac{T}{T_i}} - e^{-\frac{T}{T_i}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_i}}}. \quad (7)$$

Представлення передавальної функції суми елементарних аперіодичних ланок (3) приведеної неперервної частини у вигляді перетворює одноконтурну систему в

багатоконтурну, в якій передача інформації про пульсаційну складову вихідної напруги перетворювача передається n паралельними каналами. Кожен із паралельних каналів

формує свою складову фактора пульсацій F_i . Результуюче значення фактора пульсацій визначається виразом [11]

$$F^{-1} = 1 + \sum_{i=1}^n (F_i^{-1} - 1). \quad (8)$$

Для перетворення передавальної функції приведеної неперервної частини (1) до виду (3), виконаємо розклад її другого

додатку на елементарні аперіодичні ланки. В результаті виконаних перетворень одержимо

$$W(p) = K_n \cdot K_0 \cdot \left\{ \frac{K_1}{T_\zeta \cdot p + 1} + \frac{K_2}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{T_H \cdot (T_2 - T_H)}{T_i \cdot p + 1} + \frac{T_\zeta \cdot (T_\zeta - T_2)}{T_\zeta \cdot p + 1} \right] + \frac{K_2}{T_1 \cdot p} \right\}. \quad (9)$$

Одержаний вираз із урахуванням (4), (5) і (8) надає можливість одержати для фактора пульсацій системи автоматичного регулювання електричним гальмуванням [5] при живленні обмотки

збудження тягового двигуна від тиристорного випрямляча або широтно-імпульсного перетворювача. Так, для системи з тиристорним випрямлячем фактор пульсацій визначається виразом

$$F^{-1} = 1 + K_n \cdot K_0 \cdot \left\{ \frac{K_1 \cdot T}{2 \cdot T_\zeta} + \frac{K_2 \cdot T}{T_1} \cdot \frac{K_2}{T_1 \cdot (T_i - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \left[T \cdot (T_\zeta - T_H) + T_H \cdot (T_2 - T_H) \cdot \frac{\omega_0 \cdot T_H \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1}{1 + \omega_0^2 \cdot T_H^2} \cdot \left(\frac{T}{2 \cdot T_H} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_H} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \right] + \right. \\ \left. + \left[\frac{K_2 \cdot T_\zeta \cdot (T_\zeta - T_2) + K_1 \cdot T_1 \cdot (T_H - T_2)}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \right] \cdot \frac{\omega_0 \cdot T_\zeta \cdot \text{ctg} \alpha_0 - 1}{1 + \omega_0^2 \cdot T_\zeta^2} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{T}{2 \cdot T_\zeta} \cdot \text{cth} \frac{T}{2 \cdot T_\zeta} - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) + \frac{\text{ctg} \alpha_0}{\omega_0 \cdot T_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi}{m} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \right\}. \quad (10)$$

Аналіз виразу (10) показує, що на фактор пульсацій окрім кута керування α_0 впливають зміни коефіцієнта підсилення, який є складовою частиною K_2 тягового

двигуна в генераторному режимі під час електричного гальмування. Зміни коефіцієнта підсилення викликаються змінами швидкості поїзда [12]

$$K_{\bar{A}} = \frac{c_1 \cdot V}{R_{\bar{A}}}, \quad (11)$$

де V – швидкість руху поїзда; $R_{\bar{A}}$ в режимі холостого ходу дорівнює опору обмотки збудження, а при навантаженні

визначається добутком опорів якорного кола і кола збудження;

$$c_1 = \frac{1}{3,6 \cdot \pi} \cdot \frac{\mu \cdot p_n \cdot N}{D \cdot a}, \quad (12)$$

де μ – передатне число; p_n – число пар полюсів двигуна і збудника; N – число провідників в обмотці якоря; D – діаметр колеса; a – число пар паралельних ланок обмотки якоря.

На рис. 2 наведено сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від кута керування α_0 , а на рис. 3 – сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від швидкості руху поїзда.

Фактор пульсацій системи автоматичного регулювання з широтно-імпульсним перетворювачем із урахуванням виразів (5), (8) та (9) визначається наступним чином:

$$F^{-1} = 1 + K_n \cdot K_0 \cdot \left[\frac{K_1 \cdot T}{T_\zeta} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_\zeta}} - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}} + \frac{K_2 \cdot T}{T_1} \cdot (1 - \gamma) + \frac{K_2 \cdot T \cdot (T_2 - T_H)}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \times \right. \\ \left. \times \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_H}} - e^{-\frac{T}{T_H}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_H}}} + \frac{K_2 \cdot T \cdot (T_\zeta - T_2)}{T_1 \cdot (T_H - T_2)} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T}{T_\zeta}} - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}}{1 - e^{-\frac{T}{T_\zeta}}} \right]. \quad (13)$$

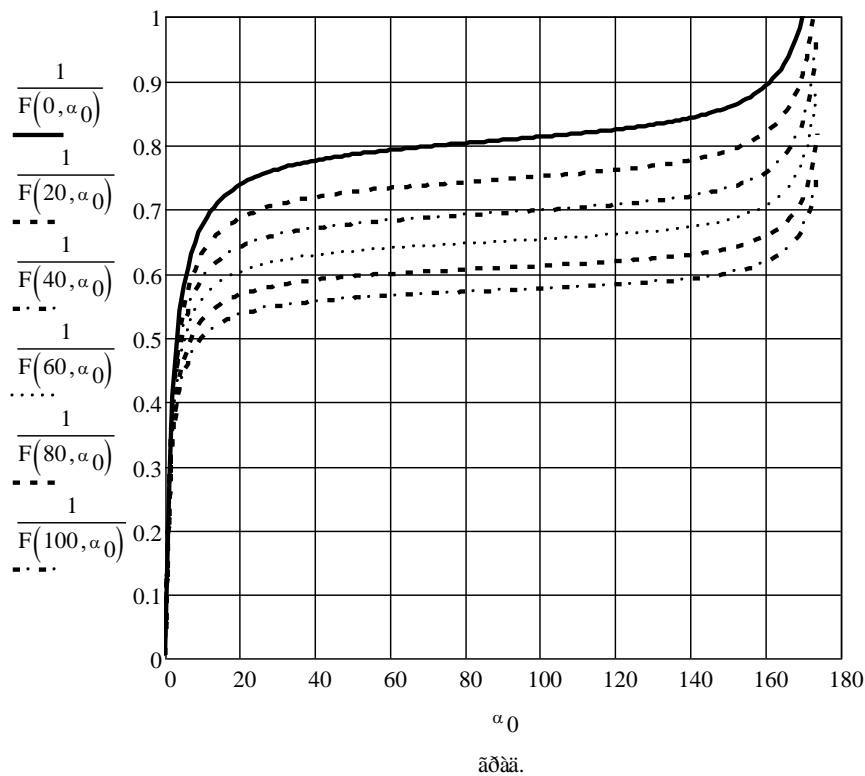


Рис. 2. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від кута керування α_0 при усталених значеннях швидкості руху поїзда

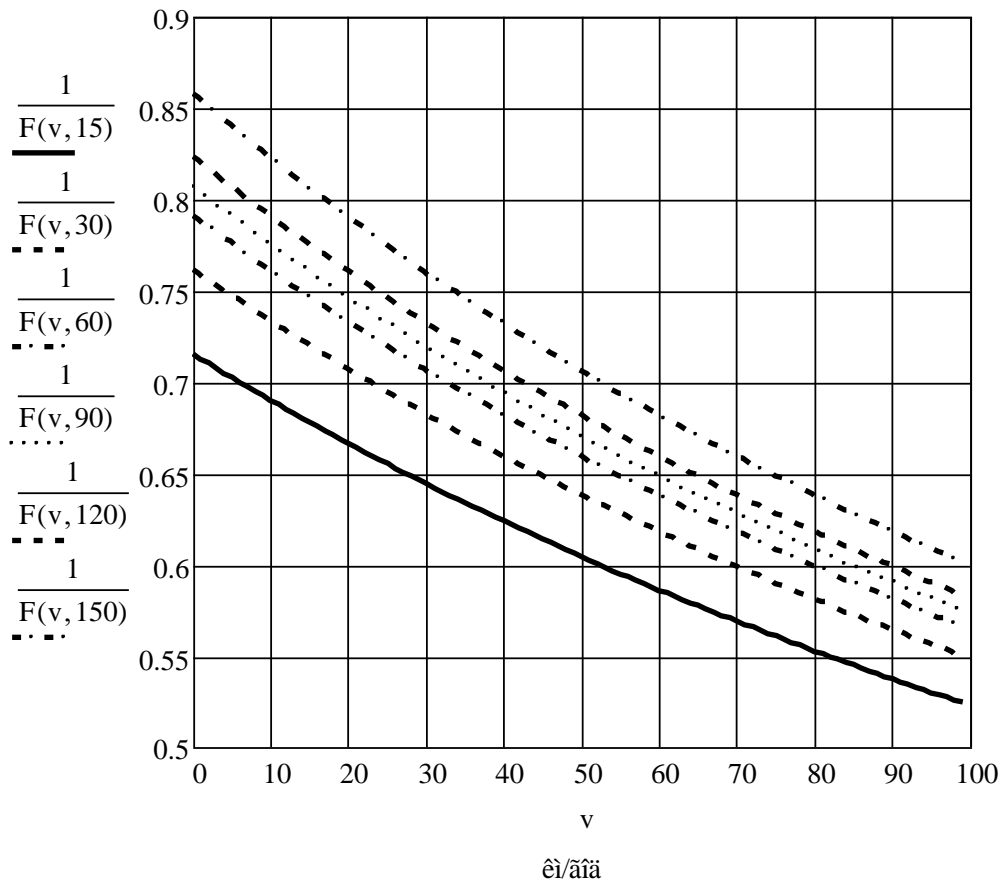


Рис. 3. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від швидкості руху поїзда при усталених значеннях кута керування

Графічні залежності, що швидкості руху поїзда наведені на рис. 4 і характеризують зміни фактора пульсацій в рис. 5. функціях керуючого параметру γ та

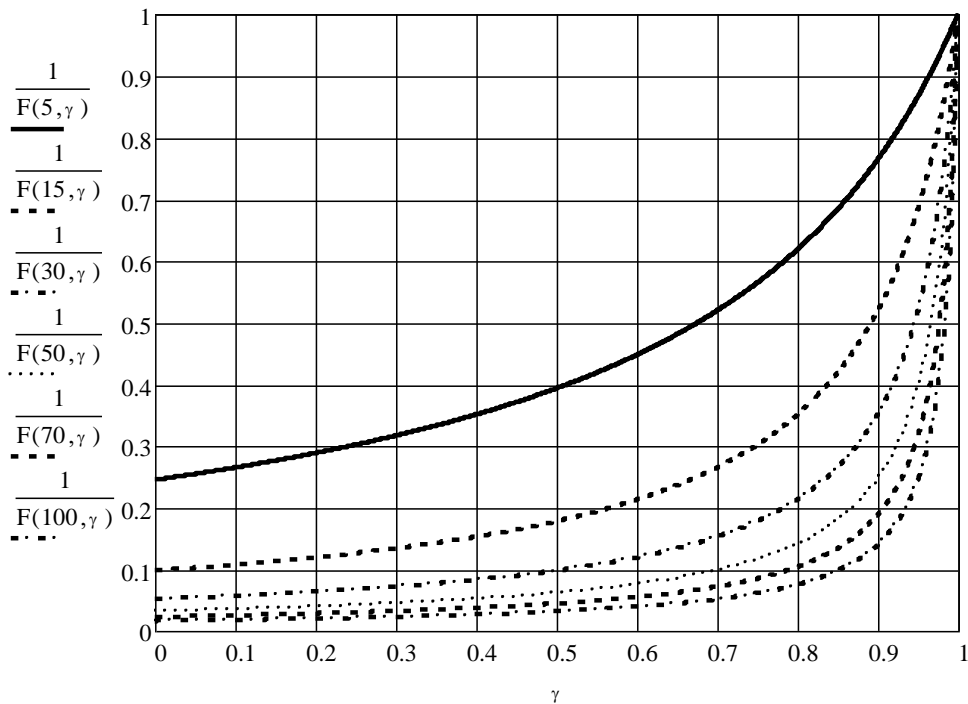


Рис. 4. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій в функціях керуючого параметру γ при усталених значеннях швидкості руху поїзда

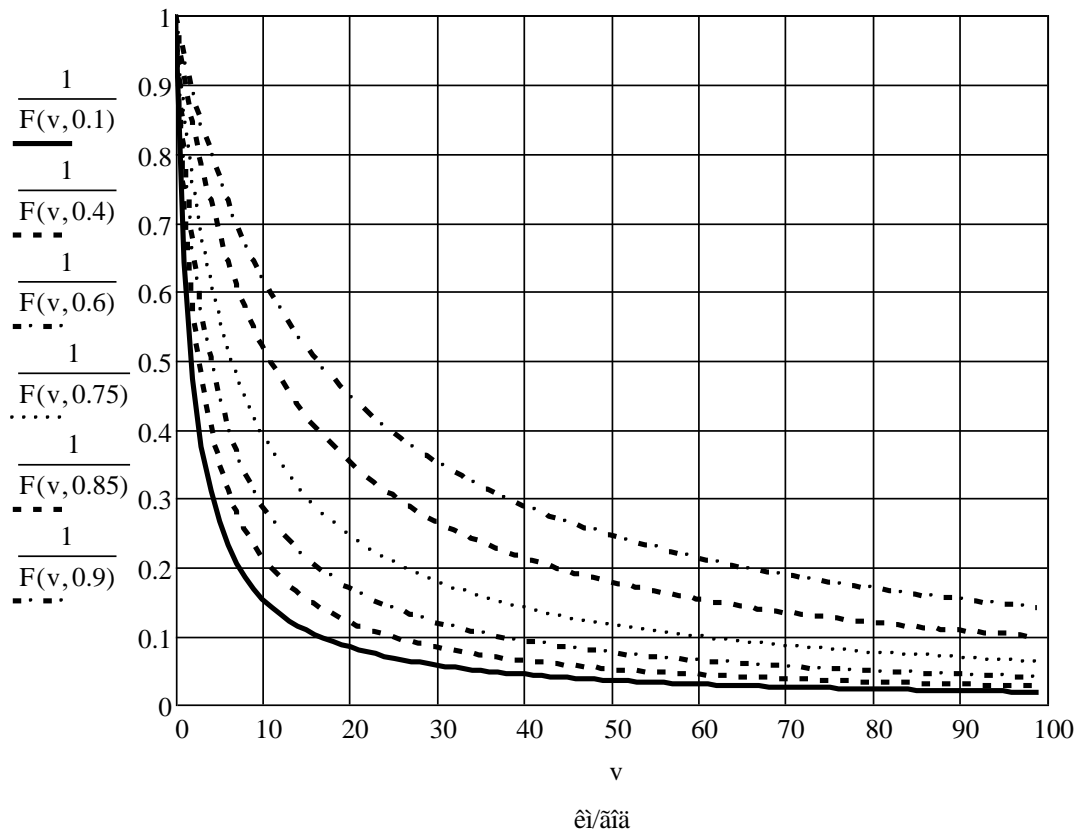


Рис. 5. Сімейство характеристик залежності фактора пульсацій від швидкості руху поїзда при ustalених значеннях керуючого параметру γ

4. Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Показано, що в системі з тиристорним випрямлячем вплив змін режимів електричного гальмування на динамічні процеси є меншим чим в системі з широтно-імпульсним перетворювачем.

Одержані аналітичні залежності для фактора пульсацій дозволяють аналізувати вплив його змін на якість електричного гальмування.

Список літератури

1. Булгаков, А.А. Основы динамики управляемых вентильных систем [Текст] / А.А. Булгаков. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1963. – 220 с.
2. Bjaresten, N.A. The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier [Text] / N.A. Bjaresten // Direct Current. – 1963. – Vol. 6. – P. 154-165.
3. Шипилло, В.П. Определение установившейся реакции линейной системы на периодическое воздействие методом z- преобразования [Текст] / В.П. Шипилло // Электромеханика. – 1975. – №5. – С. 538-543.
4. Щербак, Я.В. Анализ электромагнитных процессов ШИП применением эквивалентных импульсных моделей [Текст] / Я.В. Щербак // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – №6. – С. 89-95.
5. Щербак, Я.В. Динамічні характеристики системи автоматичного регулювання струму в режимі електричного гальмування [Текст] / Я.В. Щербак, В.П. Нерубацький // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – №1. – С. 58-63.
6. Конторович, М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях [Текст] / М.И. Конторович. – М.: Сов. Радио, 1975. – 319 с.
7. Технологічна інструкція по налагодженню схем рекуперативного гальмування електровозів постійного струму [Текст]. – Київ: ЦЕ/005. – НВЦ «Транспорт». – 2005. – 184 с.

8. Шипилло, В.П. Фактор пульсаций в системах регулирования с вентиляльными преобразователями [Текст] / В.П. Шипилло, Ю.С. Зинин // Электричество. – 1977. – №3. – С. 86-89.
9. Шипилло, В.П. Устойчивость замкнутой системы с широтно-импульсным преобразователем [Текст] / В.П. Шипилло, И.И. Чикотило // Электричество. – 1978. – №1. – С. 50-53.
10. Чикотило, И.М. Фактор пульсаций в замкнутой структуре с двусторонним широтно-импульсным модулятором [Текст] / И.М. Чикотило, О.Н. Диденко, Н.А. Волкова // Вестник ХПИ. – Харьков: ХГУ ИО «Вища школа». – 1987. – Вып. 12, №247. – С. 44-46.
11. Щербак, Я.В. Фактор пульсаций многоконтурных дискретных систем автоматического регулирования [Текст] / Я.В. Щербак // Технічна електродинаміка. – 1998. – №4. – С. 41-43.
12. Трахтман, Л.М. Электрическое торможение электроподвижного состава [Текст] / Л.М. Трахтман. – М.: Транспорт, 1965. – 204 с.

Щербак Яків Васильович, доктор технічних наук, професор, кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Тел.: (057) 730-10-73, E-mail: sherbak47@mail.ru

Нерубацький Володимир Павлович, старший викладач, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Тел.: (057) 730-10-76, E-mail: vnerubatskiy@mail.ru

Sherbak Yakiv Vasylovych, Doctor of Technical Sciences, Professor Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Contact phone: (057) 730-10-73, E-mail: sherbak47@mail.ru

Nerubatskiy Volodymyr Pavlovych, Senior Lecturer, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Contact phone: (057) 730-10-76, E-mail: vnerubatskiy@mail.ru

Стаття поступила 20.04.2015

УДК. 621.313.33

ДВОРІВНЕВИЙ ІНВЕРТОР З ПОКРАЩЕНОЮ ФОРМОЮ ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Ю.І. Гусевський, д-р техн. наук, С.М. Лутай, к-т техн. наук, А.Г. Мастепан, Ю.В. Пашинська

ДВУХУРОВНЕВИЙ ІНВЕРТОР С УЛУЧШЕНОЮ ФОРМОЮ ВИХОДНОГО НАПРЯЖЕННЯ

Ю.И. Гусевский, д-р техн. наук, С.Н. Лутай, к-т техн. наук, А.Г. Мастепан, Ю.В. Пашинская

INVERTER WITH IMPROVED OUTPUT VOLTAGE

Y. Gusevskij, doct. of techn. sciences, S. Lutay, A. Mastepan, Y. Pashinska

У статті запропоновано інвертор з поліпшеною формою вихідної напруги для сучасних електровозів. Виконано аналіз конструкційних особливостей даного інвертора, запропоновано послідовність перемикання силових ключів для отримання фазної напруги близької до синусоїдальної форми. Виконано аналіз енергетичних показників запропонованого інвертора. За базу досліджень узятий електровоз серії ДСЗ.

Ключові слова: автономні інвертори напруги, електровоз, асинхронний електродвигун, широтно-імпульсна модуляція.

В статті пропонується інвертор з удосконаленою формою вихідного напруги для сучасних електровозів. Виконано аналіз конструкційних особливостей даного інвертора, пропонується послідовність переключення силових ключів для отримання фазного напруги близького до синусоїдальної форми. Виконано аналіз енергетических показателів запропонованого інвертора. За базу досліджень взято електровоз серії ДСЗ.

Ключевые слова: автономные инверторы напряжения, электровоз, асинхронный электродвигатель, широтно-импульсная модуляция.

The article analyzes the work of two-level inverters used in modern rolling stock and proposed inverter with an improved form of the output voltage. The analysis of the structural features of this inverter is proposed switching sequence power switches for phase voltage close to sinusoidal. The shortcomings of the existing scheme inverter. Analyzed the losses in the inverter and power switches. The analysis of the energy performance of the proposed inverter. For the base of studies taken locomotive series DS3.

In a series of electric DS3 uses PWM mode start-up and acceleration, and then used once modulation. Therefore, it is important to improve the harmonic components of the output voltage, which will significantly increase the efficiency of the frequency converter and induction motor when working on long speed mode to max.

To determine the energy performance has been calculated phase currents of three-phase system of "autonomous voltage inverter - motor." Calculation is carried out by two components, based on the method of fundamental and harmonics method of equivalent static load. Calculation of phase currents made to the parameters of induction motor AD-914.

Keywords: stand-alone inverters voltage, electric, induction motor, pulse width modulation.

Вступ.

Автономні інвертори напруги (АІН) останнім часом найбільш широко застосовуються в електроприводі змінного струму з частотним керуванням у якості перетворювачів постійної напруги у змінну. Такі привода все частіше застосовуються у тяговому електроприводі, все більше витісняючи приводи постійного струму. Діапазон потужностей частотних приводів з АІН дуже широкий: від декількох ватт до десятків мегават. Типи перетворювачів частоти і принципи їх дії у частотному електроприводі достатньо докладно описані в [1, 2].

Аналіз останніх досліджень.

У якості двигуна у такому електроприводі використовується асинхронний трифазний електродвигун з коротко замкнутим ротором (АД). Для забезпечення можливості регулювання вихідних параметрів двигуна необхідно, щоб інвертор міг регулювати трифазну напругу одночасно по амплітуді і частоті. Типова схема автономного інвертора напруги з підключенням до нього двигуном зображена на рис.1.

Тут автономний інвертор живиться від автономного джерела постійної напруги. Ємність С1 згладжує пульсації з виходу випрямляча. Ключ, як правило, складається з біполярного ключа VT з польовим керуванням (IGBT-ключ) і діоду VD, який включений протилежно живлячій напрузі. Діод VD призначений для повернення енергії в мережу у випадку, коли струм через ключ має напрям, протилежний напрямку напруги на ньому. У цьому випадку струм пропускає діод VD. Подібна ситуація спостерігається при реактивно-активному навантаженні. Схема з'єднання діодів VD1-VD6 представляє собою трифазний мостовий шестипульсний діодний випрямляч, який дозволяє здійснити повернення енергії від двигуна в мережу.

У типовій схемі автономного інвертора напруги міститься 6 ключів. Транзисторні ключі, перемикаючись у певній послідовності, формують на виході інвертора періодичний трифазний сигнал. У такому інверторі фази двигуна можуть бути підключені до потенціалів постійної напруги різними способами. Результируючий вектор напруги на виході АІН має, відповідно, 8 положень, з яких 2 положення є

виродженими, оскільки вони призводять до нульового значення результуючого вектору [3].

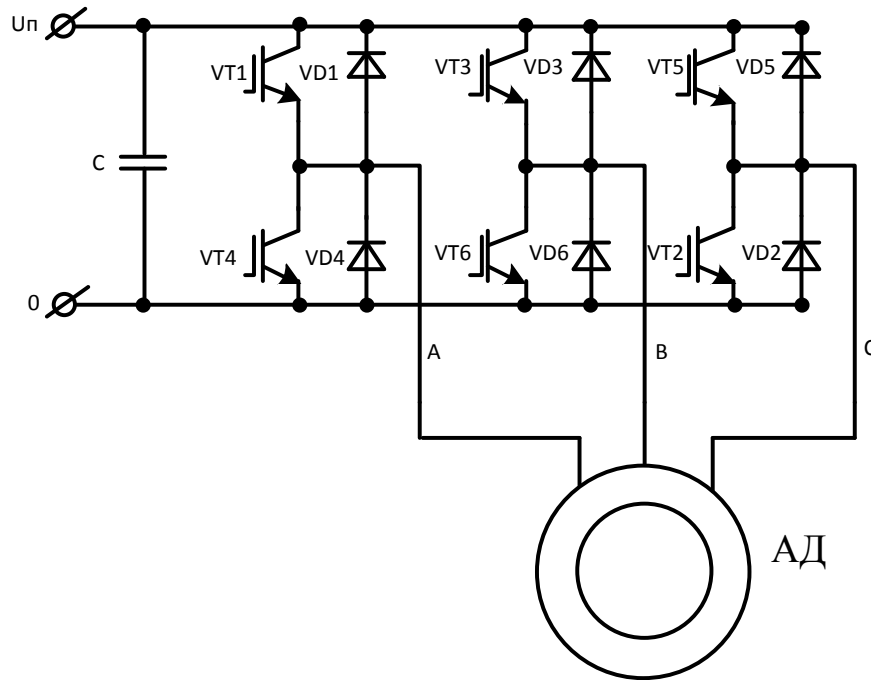


Рис.1. Типова схема дворівневого автономного інвертора напруги

Регулювання частоти трифазної напруги на виході АІН здійснюється шляхом зміни частоти перемикачів транзисторних ключів. Зміна амплітуди трифазної напруги проводиться за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) [2].

Істотним недоліком такої схеми (рис. 1) є те, що форма отриманої фазної напруги значно відрізняється від синусоїди. У результаті енергетичні характеристики асинхронного двигуна погіршуються, якщо їх порівнювати з енергетичними характеристиками двигуна, який живиться від трифазної синусоїдальної напруги.

Для покращення енергетичних характеристик приводу використовуються різноманітні способи ШІМ: синусоїдальна, лінійна [1] і ін., і їх різноманітні модифікації [4–8]. Широтно-імпульсна модуляція переслідує ціль послабити значні по амплітуді вищі гармоніки, найбільш близькі до основної. Це досягається тим, що впродовж періоду повторюваності $T_{ПВТ} = T/6$ відбувається періодична зміна основної діаграми роботи ключів інвертора при одночасному введенні нульових ділянок.

Основним недоліком ШІМ є значно більш високий рівень втрат потужності, як у самих ключах, так і у формувачах області їх безпечної роботи, до яких відносяться RC-ланцюги, які шунтують кожен ключ, і реактор L_c з шунтуючим його діодом VD0 і резистором R0 (на рисунку не показані). У всіх цих елементах втрати прямо пропорційні частоті перемикачів силових ключів [4].

Формулювання цілей статті.

На основі вищесказаного, зниження частоти ШІМ є бажаним, однак воно призводить до росту амплітуд ближніх до основної вищих гармонік на виході інвертора, що тягне за собою збільшення втрат у двигуні. З іншої сторони, ШІМ значно послаблює лише ближні до основної гармоніки. Для послаблення гармонік більш високої частоти необхідно збільшувати частоту комутації ключів інвертора, що, звичайно, призводить до збільшення втрат у перетворювачі частоти.

На електровозі серії ДСЗ ШІМ використовується в режимі пуску та розгону, а далі використовується однократна модуляція. Тому важливо покращити

гармонічну складову вихідної напруги АІН, що дозволить значно підвищити ККД перетворювача частоти та асинхронного двигуна в режимах роботи від швидкості тривалого режиму до максимальної швидкості.

Запропоновано дещо інший підхід до перетворення постійної напруги у змінну. Зі схеми на рис. 1 наочно видно, що у формуванні трифазної змінної напруги бере участь один потенціал постійної напруги, відмінний від нульового потенціалу. Для формування змінної напруги можна використовувати більше одного потенціалу постійної напруги. При такому підході нижче не застосовується широтно-імпульсна модуляція, хоча використання ШІМ і у даному випадку можливе.

На рис.2 приведена схема автономного інвертора напруги, у якому використовується два ненульових потенціала постійної напруги. Схема містить 12 транзисторних ключів VT і 6 діодів VD. Як видно, схема потребує у 2 рази більше транзисторних ключів, ніж типова схема АІН. Автономний інвертор живиться від постійної напруги з виходу некерованого діодного випрямляча (на рисунку не показаний), або від автономного джерела постійної напруги. Ємності C1 і C2 згладжують пульсації з виходу випрямляча.

Схема з'єднання діодів VD1-VD6 представляє собою трифазний мостовий шестинапівперіодний діодний випрямляч, який дозволяє здійснити повернення енергії від двигуна в мережу. У момент часу, коли струм і напруга у фазі протилежні за напрямом, струм фази пропускає один з діодів фази, в іншому випадку струм фази проводить один з ключів фази.

Таким чином, запропонована схема визначається, як трифазна дворівнева схема АІН.

Нижче пропонується наступна послідовність перемикачів транзисторних ключів для отримання фазної напруги, близької до синусоїдальної форми (цифри означають номери ввімкнутих ключів): 561; 617; 612; 128; 123; 239; 234; 347; 345; 458; 456; 569; 561 і т.д. Як видно, період формованої фазної напруги ділиться на 12 періодів повторюваності, що у два рази перевищує число періодів повторюваності для дворівневого АІН з постійною структурою силової ланки інвертора.

Зміна частоти вихідної напруги здійснюється шляхом зміни частоти перемикачів транзисторних ключів (шляхом зміни тривалості періоду повторювання). Регулювання амплітуди вихідної напруги реалізується за рахунок використання одного з законів ШІМ [2].

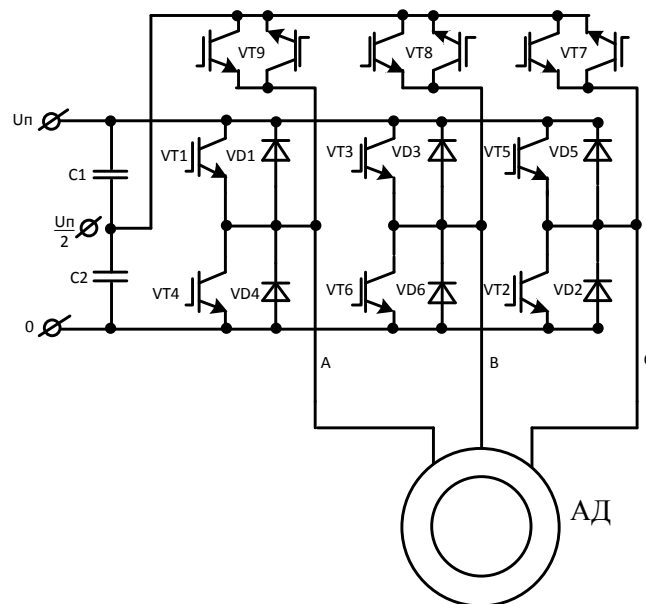


Рис. 2. Дворівневий автономний інвертор напруги з покращеною формою вихідної напруги

Дворівневий АІН із запропонованим законом керування не додає у вихідний сигнал додаткових вищих гармонік. Він істотно зменшує амплітуди близьких до основної височастотних гармонік. Крім цього, запропонований інвертор значно зменшує амплітуди ряду вищих гармонік протягом усього спектру гармонік. Так, амплітуди гармонік з номерами 5, 7, 17, 19, 29, 31, 41, 43, 53, 55, 65, 67, 77, 79, 89, 91 і т.д. зменшуються приблизно у 3,732 рази. Амплітуди гармонік з номерами 11, 13, 23,

25, 35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 83, 85, 95, 97 і т.д. залишаються незмінними.

Для визначення енергетичних показників було розраховано фазні струми трифазної системи «Автономний інвертор напруги – трифазний двигун». Розрахунок ведемо методом двох складових, який базується на методі основних гармонік і методі еквівалентів статичного навантаження [9]. Розрахунок фазних струмів зроблений за параметрами асинхронного двигуна АД-914.

Система диференціальних рівнянь
для розрахунку напруг по окремим інтервалам:

$$U_j(\theta) = i_j(\theta) \cdot R_k + L_k \cdot \frac{di_j(\theta)}{dt} \quad (1)$$

Рекурентне рівняння для розрахунку струмів:

$$i_j(\theta) = \frac{n_j \cdot U_d}{R_k} \cdot (1 - e^{-(\theta - \theta_j)/\omega\tau}) + i_{n_j} \cdot e^{-(\theta - \theta_j)/\omega\tau}; \quad (2)$$

Для розв'язку системи необхідно знати початкові умови i_{n_j} на границях інтервалів. Їх можна визначити, виходячи із умови неперервності струмів на границях інтервалів $i_{n_j} = i_{k(j-1)}$, що кінцеве значення струму кожного попереднього інтервалу є

початковим значенням струму наступного інтервалу

Оскільки система подається у вигляді одного рівняння, необхідно ввести тривалість інтервалу θ та кутову комутуючу функцію θ_j . Значення тривалості інтервалу та кутової комутуючої функції на інтервалі від 0 до $2 \cdot \pi$ наводимо в таблиці 1.

Таблиця 1 Значення тривалості інтервалу та кутової та амплітудної комутуючої функції

Параметр			
Ном ер інтервалу	Тривалість інтервалу	Кутова комутуюча функція	Амплітудна комутуюча функція
n	θ	θ_j	n_j
1	$0 \div \gamma_1$	$0 \div \pi/12$	0
2	$\gamma_1 \div \gamma_2$	$\pi/12 \div 3 \cdot \pi/12$	0,333
3	$\gamma_2 \div \gamma_3$	$3 \cdot \pi/12 \div 5 \cdot \pi/12$	0,5
4	$\gamma_3 \div (\pi - \gamma_3)$	$5 \cdot \pi/12 \div 7 \cdot \pi/12$	0,667
5	$(\pi - \gamma_3) \div (\pi - \gamma_2)$	$7 \cdot \pi/12 \div 9 \cdot \pi/12$	0,5
6	$(\pi - \gamma_2) \div (\pi - \gamma_1)$	$9 \cdot \pi/12 \div 11 \cdot \pi/12$	0,333
7	$(\pi - \gamma_1) \div \pi$	$11 \cdot \pi/12 \div \pi$	0

Загальне діюче значення фазної напруги визначається за формулою:

$$U = U_d \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{2}{9} \cdot (\gamma_2 - \gamma_1) + \frac{1}{2} \cdot (\gamma_3 - \gamma_2) + \frac{4}{9} \cdot (\pi - 2 \cdot \gamma_3) \right]}; \quad (3)$$

Амплітудне значення першої гармоніки фазної напруги розраховуємо за формулою:

$$U_{1a} = \frac{4 \cdot U_d}{3 \cdot \pi} \cdot \left(\cos(\gamma_1) + \cos\left(\frac{\gamma_2 + \gamma_3}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\gamma_3 - \gamma_2}{2}\right) \right); \quad (4)$$

Діюче значення першої гармоніки фазної напруги знайдемо за формулою:

$$U_1 = \frac{U_{1a}}{\sqrt{2}}; \quad (5)$$

Коефіцієнти викривлення напруги розраховуємо за формулою:

$$K_u = \frac{U_{1a}}{U}; \quad (6)$$

Середнє значення струму на вході інвертора розраховуємо за формулою:

$$I_d = \frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\int_{\gamma_2}^{(\pi - \gamma_2)} (i_1(\theta) - i_{k1}(\theta) + I_k(\theta)) d\theta + \int_{\gamma_3}^{(\pi - \gamma_3)} (i_1(\theta) - i_{k1}(\theta) + I_k(\theta)) d\theta \right]. \quad (7)$$

Діюче значення першої гармоніки струму визначається за формулою:

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi i_1(\theta)^2 d\theta}. \quad (8)$$

Загальне діюче значення фазного струму загальмованого АД знаходимо за формулою:

$$I_k = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi I_k(\theta)^2 d\theta}. \quad (9)$$

Діюче значення фазного струму першої гармоніки загальмованого АД визначається за формулою:

$$I_{k1} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\pi i_{k1}(\theta)^2 d\theta}. \quad (10)$$

Струми вищих гармонік розраховується за формулою:

$$I_g = \sqrt{I_k^2 - I_{k1}^2}; \quad (11)$$

Діюче значення струму знайдемо за формулою:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_g^2}; \quad (12)$$

Коефіцієнт викривлення струму визначимо за формулою:

$$K_i = \frac{I_1}{I}; \quad (13)$$

Потужність на вході інвертора визначимо за формулою:

$$P_d = U_d \cdot I_d; \quad (14)$$

Потужність першої гармоніки визначаємо за формулою:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1g} \cdot I_1 \cdot \cos(\arg(z_{екв})); \quad (15)$$

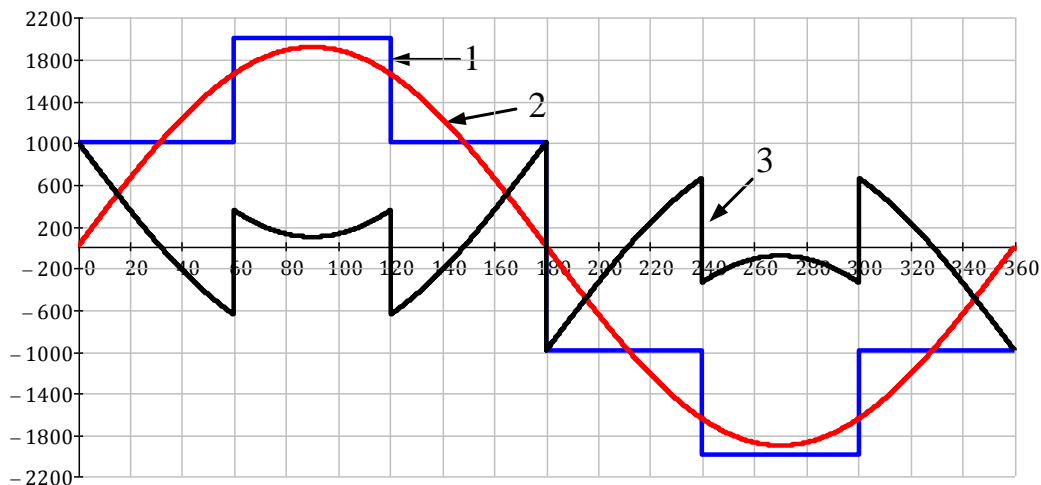
Коефіцієнт потужності розраховуємо за формулою:

$$\chi = \frac{P_d}{3 \cdot U \cdot I}; \quad (16)$$

Отримані в результаті дослідження результати.

Після усіх розрахунків було побудовано залежності фазних струмів та напруг, їх перших гармонік та вищих

гармонік від кута θ для дворівневого інвертора з покращеною формою вихідної напруги. Також наводимо ті самі залежності, але для класичного дворівневого інвертора.



1 – форма фазної напруги інвертора;
2 – форма першої гармоніки фазної напруги; 3 – форма вищих гармонік напруги

Рис. 3. Залежності напруг дворівневого інвертора



Рис. 4. Залежності напруг дворівневого інвертора з покращеною формою вихідної напруги

Порівняємо енергетичні показники запропонованого інвертора з покращеною класичного дворівневого інвертора та формою вихідної напруги.

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця енергетичних показників інверторів

Тип інвертора	K_U	K_I	K_{GU}	K_{GI}	$K_{\phi U}$	$K_{\phi I}$	$\cos\varphi$	χ
Дворівневий	0,955	0,985	0,297	0,296	1,061	1,322	0,82	0,772
Дворівневий з покращеною формою вихідної напруги	0,986	0,996	0,717	0,784	1,08	1,211	0,872	0,844

Як видно з таблиці 2, дворівневий інвертор з покращеною формою вихідної напруги має значно кращі енергетичні показники.

Висновки.

У статті розглянуті принципи формування вихідної напруги у дворівневих інверторах напруги, які використовуються у сучасному рухомому складі найчастіше. Запропоновано інвертор з покращеною

формою вихідної напруги, який має кращі енергетичні показники, що досягаються наближенням форми вихідної напруги до синусоїдальної. Що дозволяє збільшити ККД системи інвертор – асинхронний двигун на 1-2 %, що з урахуванням потужностей сучасних електровозів являється досить важливим показником.

У подальшому рекомендується розглянути та порівняти втрати в ключах

стандартної дворівневої схеми інвертора з покращеною схемою.

Список літератури

1. Герман-Галкин, С.Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями [Текст] : учебник / С.Г. Герман-Галкин, В.Д. Лебедев, Б.А. Марков, Н.И. Чичерин. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.
2. Эпштейн, И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока [Текст] : учебник / И.И. Эпштейн. — М.: Энергоиздат, 1982. — 192 с.
3. Халас, Ш. Оптимизация управления инверторами напряжения в асинхронном электроприводе [Текст] / Ш. Халас // *Электричество* / — М., 1993. №1. — С. 43–48.
4. Никитин, В.М. Управление значением выходного напряжения трехфазного инвертора [Текст] / В.М. Никитин // *Электротехника* / — М., 1996. №4. — С. 34 – 40.
5. Рывкин, С.Е., Изосимов, Д.Б. Широтно-импульсная модуляция напряжения трехфазных автономных инверторов [Текст] / С.Е. Рывкин, Д.Б. Изосимов // *Электричество* / — М., 1997/ №6. — С. 33 – 39.
6. Łukasik, Z. Asynchronous drive control of a traction vehicle using TCMS system [Text]/ Z. Łukasik, W. Nowakowski, A. Kuśmińska-Fijałkowska // *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH IN ENGINEERING & TECHNOLOGY (IJARET)*. — 2014. — Vol. 4, № 12. — P. 80–85.
7. Łukasik, Z. Train Control And Monitoring System Simulator [Text]/ Z. Łukasik, W. Nowakowski, T. Ciszewski // *INDIAN JOURNAL OF APPLIED RESEARCH*. — 2015. — Vol. 6, № 2. — P. 221–223.
8. Kaska, J. Nowoczesny układ sterowania asynchronicznego napędu trakcyjnego [Text]/ J. Kaska, Z. Łukasik, W. Nowakowski, J. Wojciechowski // XVIII Międzynarodowa Konferencja „TransComp”. — 2014. № 6. — P. 80–85.
9. Гусевський Ю.І., Сушко Д.Л., Ключка А.С. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему: «Розрахунок тягових та регулювальних характеристик асинхронного електропривода» [Текст] / Ю.І. Гусевський, Д.Л. Сушко, А.С. Ключка. — Х.: УкрДАЗТ, 2008. — 30 с.

Гусевський Юрій Ілліч, Доктор технічних наук, професор, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-75

Луцай Сергій Миколайович, Кандидат технічних наук, доцент, Кафедра електроніки та комп'ютерних технологій систем керування, Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії, Контактний тел.: 0502413255, E-mail: Dep09@ya.ru

Мастепан Антон Геннадійович, Асистент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-76 , E-mail: antonua86@bk.ru

Пашинська Юлія Володимирівна, Студент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-76

Yurij Gusevskij, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Contact tel. : (057) 730-10-75

Sergey Lutay , Ph.D., Associate Professor , Department of Electronics and Computer Technology control systems , Educational and Scientific Professional Pedagogical Institute of Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy , Contact tel. : 0502413255, E-mail: Dep09@ya.ru

Anton Mastepan , assistant , Department of automated systems of electric transport , Ukrainian State Academy of Railway Transport , Contact tel. : (057) 730-10-76 , E-mail: antonua86@bk.ru

Yulia Pashinska , student , Department of automated systems of electric transport , Ukrainian State Academy of Railway Transport , Contact tel. : (057) 730-10-76

Стаття поступила 22.04.2015

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

К-т техн. наук Ар.С. Маслий, инженер Ан.С. Маслий

**ДОСЛІДЖЕННЯ АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВЕНТИЛЬНО-
ИНДУКТОРНОГО ДВИГУНА**

К-т техн. наук Ар.С. Маслий, инженер Ан.С. Маслий

**STUDY FOR ADEQUATE MATHEMATICAL MODELS SWITCHED-INDUCTOR
ELECTRIC MOTOR**

Candid. of Techn. Sciences Ar. Masliy, engineer An. Masliy

В статье рассмотрена адекватность математической модели индукторного четырехфазного электромеханического преобразователя энергии совместно с системой управления, с целью дальнейшего её использования в качестве основного инструмента при исследовании режимов работы. Для моделирования в качестве исходных данных взяты параметры вентильно-индукторного двигателя, разработанного одесским научным коллективом. Основное внимание исследований в данной работе направлено на получение динамических характеристик машины. Кроме того, проведено исследование адекватности существующих математических моделей вентильно-индукторного двигателя для дальнейшего использования при настройке регуляторов.

Ключевые слова: вентильно-индукторный двигатель, датчик положения ротора, электронный коммутатор.

У статті розглянута адекватність математичної моделі індукторного чотирьохфазного електромеханічного перетворювача енергії спільно з системою керування, з метою подальшого її використання в якості основного інструменту при дослідженні режимів роботи. Для моделювання в якості вихідних даних взяті параметри вентильно-індукторного двигуна, розробленого одеським науковим колективом. Основна увага досліджень в даній роботі спрямована на одержання динамічних характеристик машини. Крім того, проведено дослідження адекватності існуючих математичних моделей вентильно-індукторного двигуна для подальшого використання при налаштуванні регуляторів.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун, датчик положення ротора, електронний комутатор.

The article considers the adequacy of the mathematical model of the inductor four-phase electromechanical energy converter in conjunction with the control system, in order to further its use as the main tool in the study of modes of operation. For the simulation as input parameters are taken valve-inductor motor developed Odessa research team. Proposed in how to configure the controller gain factor involves the definition of a constructive view along curves of the dependence of the flux current and rotor position. It is assumed that working for appearance will be the area in which its magnetic system is saturated. However working zone characterized unsaturated magnet system, then only the local saturation of the stator teeth and the rotor. But this approach does not provide the necessary quality of transients during acceleration feel. In view of the nonlinear structures proposed method for setting the coefficients of regulators linearized magnet system is unacceptable. The main focus of research in this paper is aimed at obtaining the dynamic characteristics of the machine. In addition, a study of the adequacy of existing mathematical models of four-phase switched-inductor electric motor for later use when you configure the controllers.

Keywords: switched-inductor electric motor, rotor position sensor, the electronic switch.

Введение. На сегодняшний день развитие микросхемотехники позволяет расширить функциональные возможности электропривода, а также создать микропроцессорные системы управления. Использование бесконтактных датчиков нового поколения, применения электронной преобразовательной техники дало толчок к развитию вентильно-индукторных приводов.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. Как известно, вентильно-индукторный двигатель (ВИД) характеризуется существенными нелинейностями. Анализ литературных источников показал, что для настройки регуляторов скорости либо тока ВИД применяется линеаризация магнитной системы. Предложенные различные методики настройки предполагают определение конструктивного коэффициента ВИД по кривым зависимостей потокосцепления от тока и положения ротора. При этом предполагается, что рабочей для ВИД будет зона, в которой его магнитная система является насыщенной. Однако для такой машины характерны рабочие зоны с ненасыщенной магнитной

системой, то есть имеются лишь локальные насыщения зубцов статора и ротора. Но такой подход не обеспечивает необходимое качество переходных процессов при разгоне ВИД. С учетом вышесказанного, нахождение коэффициентов регуляторов в основном производится с использованием математической модели объекта регулирования. Поэтому адекватность модели такого типа машины отображается на качестве настройки регуляторов.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время для моделирования электромеханических систем на основе ВИД используется:

- моделирование на основе решения дифференциальных уравнений электрических цепей фаз ВИД [1];
- моделирование на основе цепно-полевой математической модели [2];
- моделирование на основе подхода обобщенного электромеханического преобразователя энергии [3].

Основная часть исследования. ВИД представляет собой электромехатронную систему, функциональная схема которой приведена на рис.1.

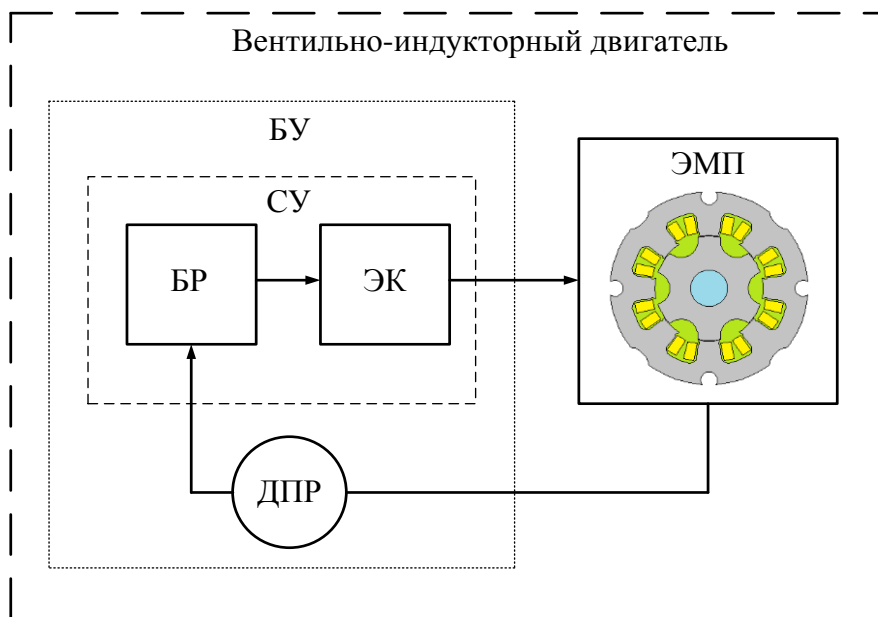


Рис. 1. Функциональная схема ВИД

ВИД включает в себя электромеханический преобразователь (ЭМП) и блок управления (БУ). БУ состоит из системы управления (СУ) и датчика положения ротора (ДПР). Функциональное назначение этих элементов следующее: электронный коммутатор (ЭК) обеспечивает питание фаз ЭМП однополярными

импульсами напряжения прямоугольной формы, блок регулирования (БР) в соответствии с заложенным в него алгоритмом и сигналами обратной связи, поступающими от датчика положения ротора, управляет данным процессом. ЭК выполнен по схеме Миллера [5] (рис.2).

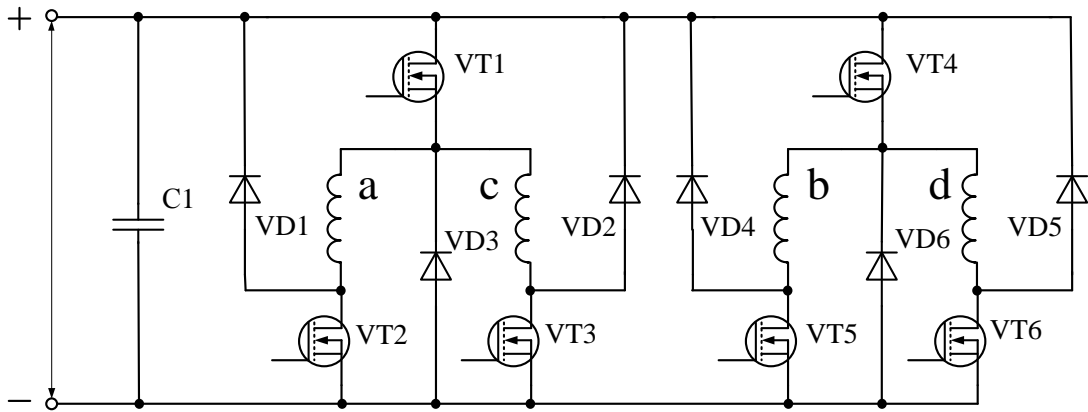


Рис. 2 Схема ЭК четырехфазного ВИД с шестью транзисторами

В работе [4] представлена математическую модель ВИД на основе решения уравнения Лагранжа для электромеханической системы с учетом взаимного влияния магнитных потоков смежных фаз двигателя. При этом в качестве

объекта управления был использован четырехфазный ВИД, разработанный научным коллективом под руководством д.т.н. профессора Рымши В.В. Технические данные такой машины приведены в табл. 1.

Таблица 1 –

Технические данные ВИД

Геометрические параметры ротора		Электромеханические параметры	
Диаметр ротора, мм	28,7	$U_H, В$	27
Активная длина ротора, мм	30	$I_H, А$	2,5
Диаметр расточки статора, мм	29	$M_H, Нм$	0,05
Ширина зубца статора, мм	5,5	$n_H, об / мин$	4500
Ширина зубца ротора, мм	6,1	$R_\phi, Ом$	0,68
Число витков фазы	60	$L_d, мГн$	1,72
Момент инерции, кг/м ²	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$L_q, мГн$	0,36

Для контроля положения ротора, а также скорости и направления его вращения, использован встроенный в конструкцию ВИД оптический инкрементальный датчик HEDS-9140, позволяющий получить 360 импульсов за один оборот вала.

Используя различные подходы к моделированию ВИД были созданы математические модели машины. Характеристики фазного напряжения и тока для этих моделей при моменте

сопротивления 0,03 Нм представлены на рис. 3 (а – эксперимент; б – математическая модель с учетом взаимного влияния фаз двигателя; в – математическая модель в среде MATLAB из библиотеки SymPowerSystems пакета Simulink; г – математическая модель на основе подхода обобщенного электромеханического преобразователя энергии). Их сравнительный анализ приведен в таблице 2.

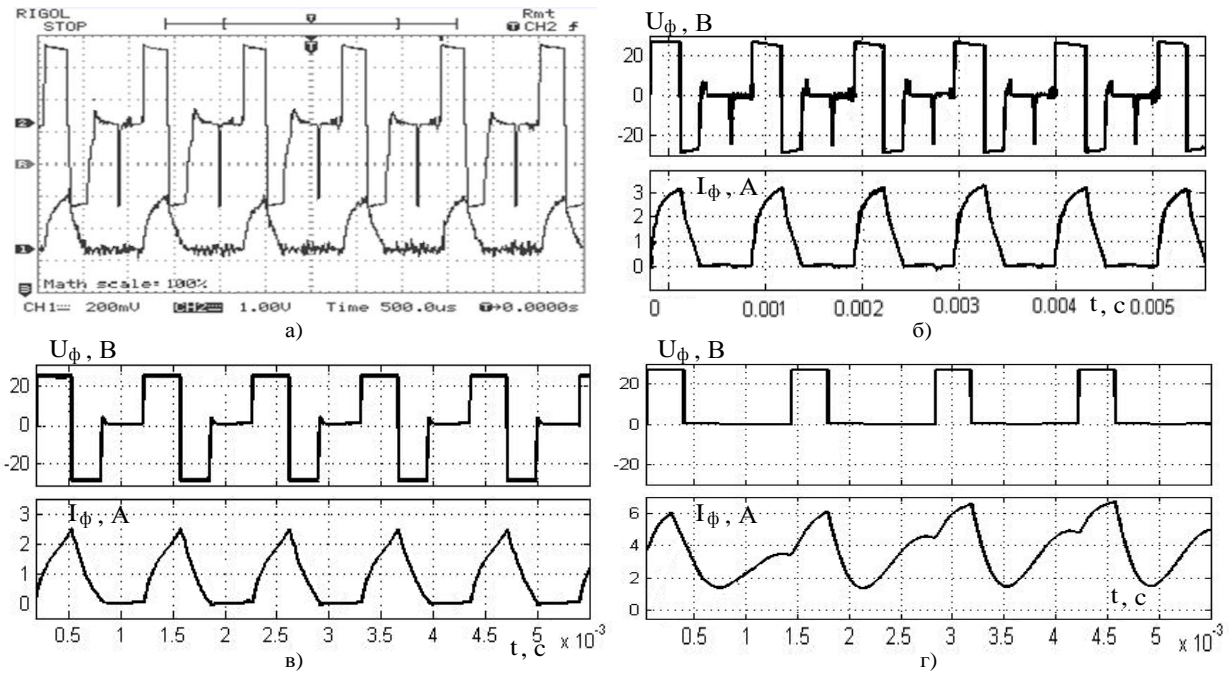


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения фазы ВИД, снятые при помощи различных моделей для $M_c=0,03 \text{ Нм}$

Таблица 2 –

Сравнительный анализ адекватности мат. моделей ВИД

Тип модели	Параметр					
	I _{фmax}		I _{фср}		n	
	Знач. А	Откл. %	Знач. А	Откл. %	Знач. об/мин	Откл. %
Эксперимент	3,2	-	1,07	-	10000	
С учетом взаимного влияния фаз	3,1	3,13	1,16	7,4	10330	3,3
В среде MATLAB	2,6	18,75	0,82	23,4	9120	9,8
На основе обобщенного ЭМП	6,25	95	2,93	174	8150	18,5

Выводы из исследования, перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.

Из результатов, приведенных в таблице 2, следует, что при моделировании ВИД с учетом взаимного влияния фаз ошибка по основным координатам находится

в пределах 3-7% (для двух других моделей ошибка составляет 10-174%). Это подтверждает адекватность используемой математической модели и правильность подхода к моделированию машины при дальнейшем использовании ее для более качественной настройки регуляторов.

Список использованных источников

1. Рябов Е.С. Имитационная модель тягового вентильно-индукторного электропривода [Текст] / Б.Г. Любарский, Е.С. Рябов, Л.В. Оверьянова, В.Л. Емельянов // Электротехника і електромеханіка.– 2009.– №5. – С. 67–72.
2. Рымша В.В. Усовершенствованная цепно-полевая модель вентильно-реактивного двигателя [Текст] / В.В. Рымша, И.Н. Радимов, М.В. Гулый, П.А. Кравченко // Электротехника і електромеханіка.– 2010.– №5. – С. 24-26.
3. Голландцев Ю.А., Вентильные индукторно-реактивные двигатели [Текст] / Голландцев Ю.А. – Санкт-Петербург: Издательство центрального научно-исследовательского института «Электроприбор», 2003. – с. 147.

4. Маслий А.С. Микропроцессорный вентильно-индукторный электропривод стрелочного перевода моношпального типа: дис. к.т.н.: 05.09.03 [Текст] / Маслий А. С. Харьков, 2014. – 192 с

5. Гулый М.В. Вентильно-реактивный электродвигатель для аппаратов искусственной вентиляции лёгких: дис. к.т.н.: 05.09.01 [Текст] / Гулый М.В. Одесса, 2010. – 169 с.

Маслий Артем Сергійович, к-т техн. наук, асистент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел. : +38974137970. E-mail: a.masliy@bk.ru.

Маслий Андрій Сергійович, інженер ТОВ «Укртрансигнал». Тел.: + 380965426745. E-mail: an_com@ukr.net.

Artem Masliy, Candid. of Techn. Sciences assistant of the department of the automated systems of electric transport of Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: +38974137970. E-mail: a.masliy@bk.ru.

Andrey Masliy, engineer of OLL «Ukrtransignal». Tel.: +380965426745. E-mail: an_com@ukr.net.

Стаття поступила 21.04.2015

УДК 621.311

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ТРАНСФОРМАТОРОМ НА ВИЗУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Канд. техн. наук. Е. В. Ягуп

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЮ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МЕРЕЖІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ТРАНСФОРМАТОРОМ НА ВИЗУАЛЬНІЙ МОДЕЛІ

Канд. техн. наук. К. В. Ягуп

CALCULATION OF PARAMETERS OF REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICE OF POWER SUPPLY LINE WITH TRANSFORMER ON THE VISUAL MODEL

PhD in Technical Science K. Iagup

В статье исследованы процессы компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения на визуальной модели, созданной в программе MATLAB. Компенсирующее устройство состоит из симметро-компенсирующих конденсаторов, подключенных к линиям электропередачи через понижающий трансформатор. Предварительно проведен расчет параметров трансформатора, которые и были заложены в модель. В результате компьютерных экспериментов было установлено, что при снижении коэффициента трансформации величины емкостей конденсаторов увеличиваются. При этом достигается практически полная компенсация реактивной мощности и полное симметрирование токов в сети электроснабжения.

Ключевые слова: реактивная мощность, симметро-компенсирующие конденсаторы, коэффициент трансформации.

У статті досліджено процеси компенсації реактивної потужності в системі електропостачання на візуальній моделі, що створена в програмі MATLAB. Компенсуючий пристрій складається з симетро-компенсуючих конденсаторів, що були підключені до ліній електропередачі через понижуючий трансформатор. Попередньо проведено розрахунок параметрів трансформатора, які і були закладені в модель. В результаті комп'ютерних

дослідів було встановлено, що при зниженні коефіцієнта трансформації величини ємностей конденсаторів збільшуються. При цьому досягається практично повна компенсація реактивної потужності і повне симетрування струмів в мережі електропостачання.

Ключові слова: реактивна потужність, симетро-компенсуючі конденсатори, коефіцієнт трансформації.

The article explores the possibility of reactive power compensation in the power supply system on the visual model created in the software package MATLAB. In the power supply system reactive power arises because of the asymmetric distribution of active-inductive load on phases of electrical network. In this case, a fairly large amplitude currents power lines are observed.

The compensating device is represented by symmetry-compensating capacitors connected to a power line through a step-down transformer. Previously calculations of transformer parameters required for its modeling in MATLAB were carried out: power, input and output voltages, winding resistances and leakage inductance, active and inductive resistances of magnetization branch.

The search for optimal parameters of symmetry-compensating device was carried out with using the built-in MATLAB function of search optimization fminsearch, which operates on Nelder-Mead optimization algorithm. Computer experiments were performed for models with different ratios of transformation of symmetry-compensating device. As a result, it was found that the values of the capacitors increases with decreasing ratio of transformation. Almost complete compensation of reactive power, a significant reduction in the amplitude values of current networks and their full symmetry were achieved at the end of the optimization

Keywords: reactive power, compensation capacitors, unbalanced load, transformation ratio.

Актуальность

Внедрение в эксплуатацию таких современных устройств, как частотные преобразователи электроприводов, импульсные блоки питания, систем кондиционирования и освещения, а так же активное использование асинхронных двигателей и других электрических машин, приводит к возникновению реактивной мощности в трехфазных сетях. Передача в сеть реактивной мощности приводит к таким негативным последствиям, как неполное использование трансформаторов, первичных двигателей и генераторов электростанций, дополнительным активным потерям мощности и энергии в сети, увеличению потерь напряжения в линии электропередачи, перегреву проводов, что в свою очередь увеличивает удельный расход топлива [1]. Поэтому компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения становится все более актуальной задачей.

Одним из наиболее экономичных и эффективных способов компенсации реактивной мощности является применение конденсаторных установок. Преимущества их использования состоят в небольших

эксплуатационных затратах и простоте монтажа и обслуживания. В [2] была рассмотрена возможность полной компенсации реактивной мощности в системе с несимметричной активно-индуктивной нагрузкой на основе использования компенсирующего устройства, состоящего из межфазных конденсаторов. Однако в [2] не рассматривался случай, когда напряжение в линиях электропередачи может существенно превышать напряжение, подаваемое на компенсирующее устройство. В таком варианте целесообразно обеспечить питание симетро-компенсирующих конденсаторов через понижающий трансформатор.

Цели и задачи исследования

Целью статьи является расчет параметров симетро-компенсирующего устройства, подключаемого к сети через трансформатор, при помощи поисковой оптимизации на основе компьютерной модели трехфазной системы электроснабжения с компенсирующим устройством, состоящим из трансформатора и конденсаторов.

Основная часть исследования
Рассмотрим трехфазную систему электроснабжения, к которой подключен

трансформатор с симметрирующими конденсаторами (рис. 1).

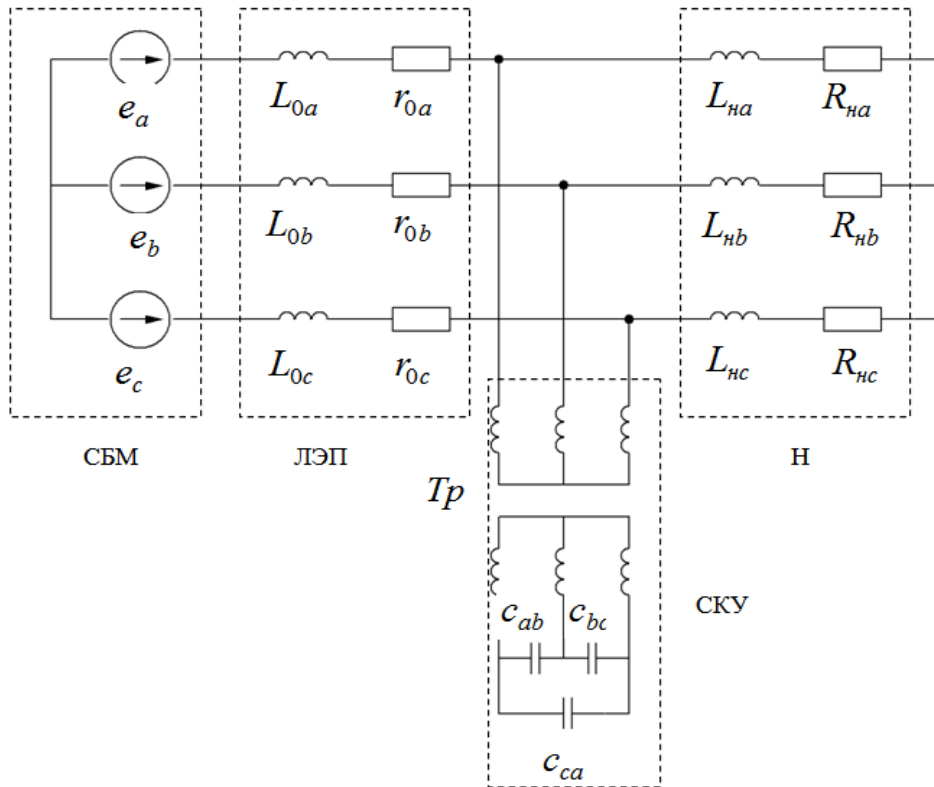


Рис. 1 – Трехфазная электрическая сеть с симметрирующим конденсаторным устройством компенсации реактивной мощности.

Амплитуды фазных напряжений источников сети бесконечной мощности (СБМ) равны $U_a = U_b = U_c = 100 В$. Сопротивления и индуктивности в линии электропередачи (ЛЭП) соответственно приняты $r_{0a} = r_{0b} = r_{0c} = 0,1 Ом$ и $L_{0a} = L_{0b} = L_{0c} = 0,001 Гн$. Нагрузка (Н) по фазам распределена неравномерно и характеризуется следующими значениями сопротивлений и индуктивностей:

$$R_a = 0,7 Ом; L_a = 0,005 Гн; R_b = 1 Ом; L_b = 0,01 Гн; R_c = 2 Ом; L_c = 0,01 Гн; C_{ca} = 34,46 мкФ.$$

Первичные и вторичные обмотки трансформатора соединены в звезду, а конденсаторы соединены треугольником. Для модели рассчитаем номинальные параметры трансформатора: мощность, активные и индуктивные сопротивления обмоток. Расчет будем осуществлять исходя

из рассчитанных в [2] значений емкостей симметрирующих конденсаторов в схеме без подключения трансформатора. Расчет номинальных параметров трансформатора осуществляется исходя из максимального тока нагрузки трансформатора при рассмотрении схемы системы электроснабжения без трансформатора. В [2] в результате оптимизации были получены следующие величины симметрирующих конденсаторов:

При расчете мощности трансформатора, ориентируемся на конденсатор C_{ab} с наименьшим сопротивлением:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,6209} \cdot 10^6 = 5,664 Ом \quad (1)$$

Амплитудное значение тока этого конденсатора

$$I_m = \frac{U_{\text{л}}}{x_C} = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{5,664} = 30,5807 \text{ A} \quad (2)$$

Мощность в одной фазе представлена произведением линейного тока на линейное межфазное напряжение

$$P_a = \frac{I_m U_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{30,5807 \cdot 100}{2} = 2648,363 \quad (3)$$

Номинальное значение мощности трансформатора:

$$2648,363 \cdot 3 = 7945,088 \text{ Вт} \quad (4)$$

Примем номинальную мощность трансформации 4:1, током холостого хода, трансформатора равной типовой 10 000 Вт. составляющим 2% и напряжением короткого

Осуществим расчет внутренних замыкания 7%, активные потери в опыте сопротивлений и индуктивностей холостого хода приняты $P_x=70$, активные трансформатора подключенным линейно к потери в опыте короткого замыкания линии электропередачи с коэффициентом $P_k=600$.

Рассчитаем действующее линейное напряжение первичной обмотки:

$$U_{1н} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\phi}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{\sqrt{2}} = 122,45 \text{ В} \quad (5)$$

Действующее линейное напряжение вторичной обмотки рассчитаем исходя из заданного коэффициента трансформации:

$$U_{2н} = \frac{U_{1н}}{k} = \frac{122,45}{4} = 30,619 \text{ В} \quad (6)$$

Мощность, приходящаяся на одну фазу:

$$S_1 = \frac{S_H}{3} = \frac{10000}{3} = 3333,33 \text{ Вт} \quad (7)$$

Действующее значение напряжения на первичной обмотке трансформатора:

$$U_{1ф} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{3}} = \frac{122,48}{\sqrt{3}} = 70,71 \text{ В} \quad (8)$$

Номинальный ток первичной обмотки трансформатора находим как отношение номинальной мощности к номинальному фазному напряжению:

$$I_{1н} = \frac{S_1}{U_{1ф}} = \frac{3333,33}{70,71} = 47,14 \text{ А} \quad (9)$$

Номинальный ток во вторичной обмотке:

$$I_{2н} = \frac{I_{1н} \cdot U_{1н}}{U_{2н}} = \frac{47,14 \cdot 122,474}{30,619} = 188,562 \text{ А} \quad (10)$$

Рассчитаем фазное напряжение короткого замыкания

$$U_{кф} = \frac{e_k \cdot U_{1ф}}{100} = \frac{7 \cdot 70,71}{100} = 4,95 \text{ В} \quad (11)$$

Полное сопротивление короткого замыкания находим как отношение напряжения короткого замыкания к номинальному току.

$$Z_k = \frac{U_{Kf}}{I_{н\text{ю.м}}} = \frac{4,95}{47,14} = 0,105 \text{ Ом} \quad (12)$$

Активную составляющую сопротивления короткого замыкания рассчитаем по следующей формуле:

$$R_k = \frac{P_k}{3I_{н\text{ю.м}}^2} = \frac{600}{3 \cdot 47,14^2} = 0,09 \text{ Ом} \quad (13)$$

Найдем реактивную составляющую короткого замыкания .

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0,105^2 - 0,09^2} = 0,054 \text{ Ом} \quad (14)$$

Активные и индуктивные сопротивления первичной обмотки трансформатора будем считать половине активного и индуктивного сопротивления короткого замыкания.

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_k}{2} = 0,045 \text{ Ом} \\ X_1 &= \frac{X_k}{2} = 0,027 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (15)$$

Активное сопротивление вторичной обмотки в Т-образной схеме замещения:

$$R_2 = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \cdot R_1 = 0,002813 \text{ Ом} \quad (16)$$

Индуктивность рассеивания первичной обмотки в Т-образной схеме замещения

$$L_{1s} = \frac{X_1}{\omega} = 0,00008608 \text{ Гн} \quad (17)$$

Индуктивность рассеивания вторичной обмотки в Т-образной схеме

$$L_{2s} = \left(\frac{U_{2H}}{U_{1H}} \right)^2 \cdot L_{1s} = 0,00000538 \text{ Гн} \quad (18)$$

Ток холостого хода в первичной обмотке:

$$I_x = \frac{i_x \cdot I_{1H}}{100} = 0,94281 \text{ А} \quad (19)$$

Полное сопротивление холостого хода:

$$Z_x = \frac{U_{1\Phi}}{I_x} = 75 \text{ Ом} \quad (20)$$

Активное сопротивление холостого хода

$$R_x = \frac{P_x}{m \cdot I_x^2} = 26,25 \text{ Ом} \quad (21)$$

Вычислим индуктивное сопротивление холостого хода:

$$X_x = \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} = 70,256 \quad (22)$$

Рассчитаем активное сопротивление, отражающее потери в стали сердечника:

$$R_{\mu} = R_x - R_1 = 26,205 \text{ Ом} \tag{23}$$

Индуктивное сопротивление последовательной намагничивающей ветви

$$X_{\mu} = X_x - X_{1S} = 70,229 \text{ Ом} \tag{24}$$

Вычислим параметры параллельной намагничивающей ветви:

$$R_m = R_{\mu} + \frac{X_{\mu}^2}{R_{\mu}} = 214,419 \text{ Ом};$$

$$X_m = X_{\mu} + \frac{R_{\mu}^2}{X_{\mu}} = 80,007 \text{ Ом}. \tag{25}$$

Таким образом, вычислены все параметры трансформатора, которые далее будут подставлены в модель MATLAB.

Реализация компьютерной модели трехфазной системы электроснабжения с компенсирующей системой, которая позволяет определить оптимальные условия компенсации реактивной мощности, приведена на рис. 2. Параметры модели соответствуют указанным ранее и рассчитанным значениям.

В модели мгновенные значения токов и напряжений измеряются виртуальными амперметрами и вольтметрами и передаются специальным блокам расчета реактивных мощностей фаз Sa, Sb и Sc. Затем вычисляется среднеквадратичный функционал реактивных мощностей, для

чего используются блоки умножителей и сумматора, который и принимается за целевую функцию. Значение целевой функции передается в рабочее пространство MATLAB, где используется встроенной файл-функцией оптимизации fminsearch(). В процессе оптимизации значение целевой функции сводится к минимуму посредством изменения значений емкостей конденсаторов Cab, Cbc и Cca. При проведении экспериментов был использован метод stiff23s Розенброка, шаг интегрирования 0.0001 с, что позволило проводить расчеты с достаточно высокой точностью. Время прогона модели составляет 0.06 с, что является достаточным для выхода модели на установившийся режим

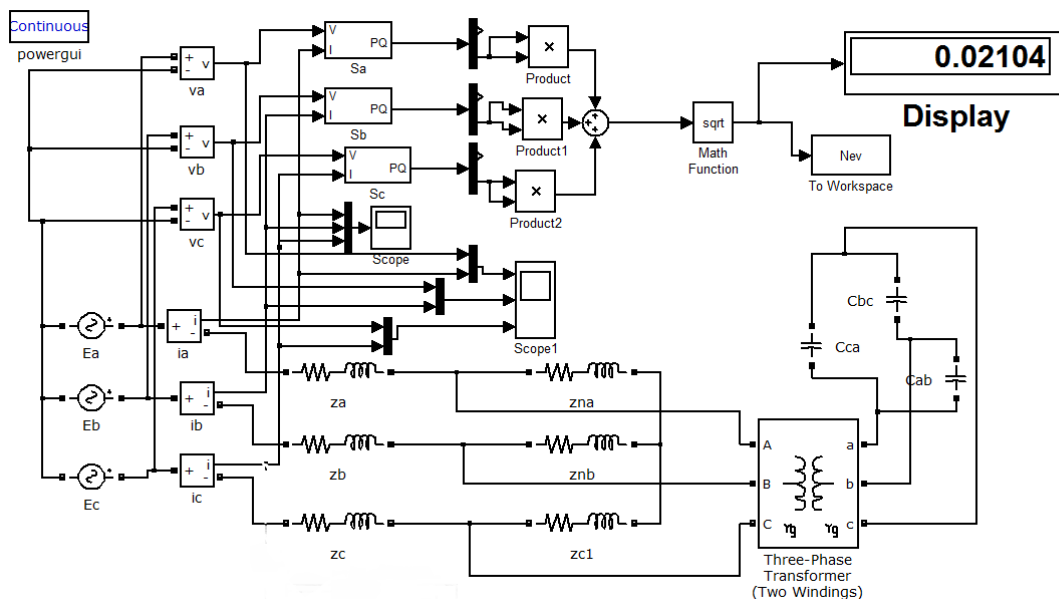


Рис. 2 – Визуальная модель трехфазной системы электроснабжения с симметрирующим устройством

Результаты исследования

Начальные значения параметров оптимизации принимаются равными 10 мкФ, при этом начальное значение целевой функции составляет 1199. При этом наблюдался большой разброс в значениях амплитуд токов в фазах. Также следует отметить, что значения амплитуд токов были достаточно велики превышая 30 А (рис. 3).

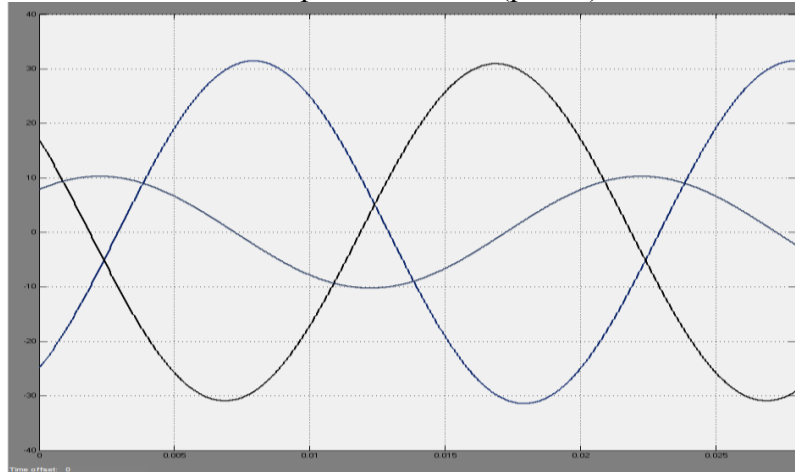


Рис. 3 – Временные диаграммы сетевых токов до оптимизации

Оптимизация проводилась для трансформации трансформатора. Результаты нескольких вариантов работы модели, в оптимизации сведены в таблицу 1. которых менялся коэффициент

Таблица 1. – Результаты моделирования

Коэффициент трансформации	C_{ab}	C_{bc}	C_{ca}
100:100	5,5980e-004	2,0741e-004	4,0230e-005
100:50	0,0022	8,2962e-004	1,6092e-004
100:25	0,0090	0,0033	6,4397e-004

В результате проведенных исследований снижение коэффициента трансформации приводило к возрастанию значений емкостей конденсаторов, что отображено на рис. 4

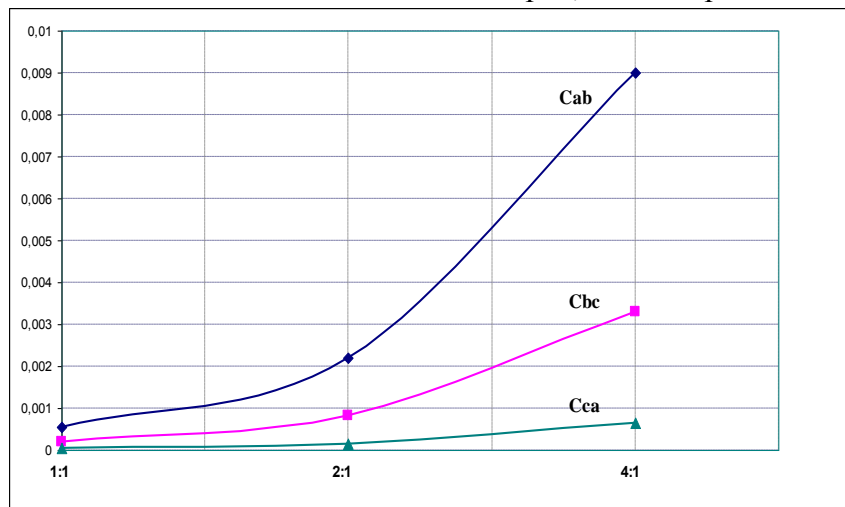


Рис. 4. – Зависимость значений емкостей конденсаторов от коэффициента трансформации

На рис. 5 приведені графики фазних токов после установления режима компенсации. Из них видно, что их амплитуды стали равными по величине (7,8

А), а фазы в точности совпадают с фазами питающих напряжений, что свидетельствует о том, что источники отдают лишь активную мощность.

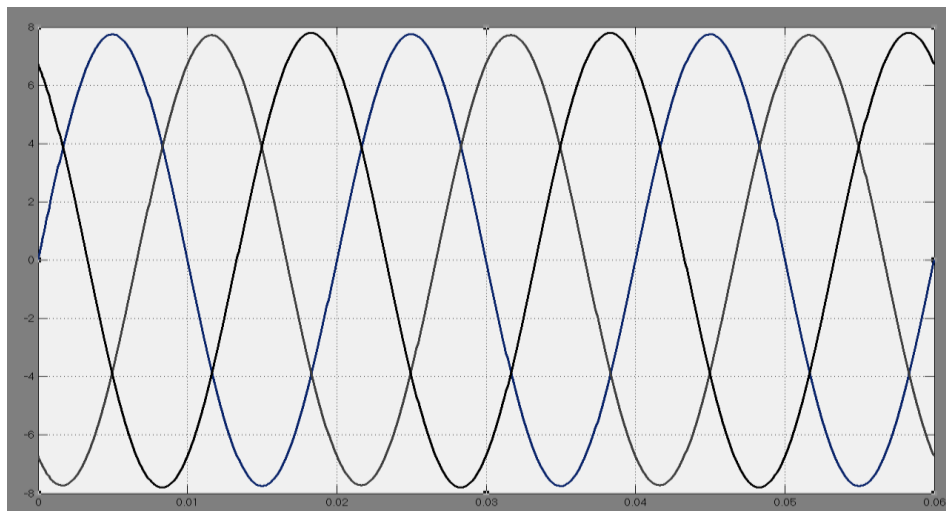


Рис. 5 – Временные диаграммы сетевых токов после оптимизации при коэффициенте трансформации 4:1.

Выводы.

1. Исследована возможность подключения симметричного конденсаторного устройства к системе электроснабжения через понижающий трансформатор, что может быть применено в тех случаях, когда напряжение системы достаточно высоко.
2. Путем моделирования при помощи алгоритмов поисковой оптимизации достигнута компенсация реактивной мощности и полное симметрирование в исследуемой системе электроснабжения.
3. Рассчитываемые предложенным методом параметры симметричного компенсирующего устройства обеспечивают совершенную компенсацию и симметрирование с учетом реактивного и несимметричного характера нагрузки, а так же реактивностей линии электропередачи и трансформатора симметричного компенсирующего устройства.
4. Результаты расчетов представлены в виде графиков, отражающих для принятой нагрузки изменения емкостей конденсаторов в зависимости от коэффициента трансформации понижающего трансформатора.

Литература:

1. Минин Г.П. Реактивная мощность. – М. Энергия, 1978. – 88 с.
2. Ягуп В.Г. Ягуп, В.Г. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации [Текст] // В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – 2011. – Вип. 11 (186). – С. 449–454.
3. Nelder, J. A. A Simplex Method for Function Minimization [Text] / J. A. Nelder, R. Mead // Computer J. – 1965. – Vol. 7, Issue 4. – P. 308–313
4. Дьяконов, В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Я.В.Щербак

Ягуп Катерина Валеріївна, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричної тяги Українського державного університету залізничного транспорту.
Тел. (057)730-10-76

Iagup Katerina Valeriivna, cand. of techn. Sciences, the senior lecture of Department of automated electric transport systems of the Ukrainian State University of Railway Transport.
Tel. (057)730-10-76

Стаття постувила 20.04.2015

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ТРЕХФАЗНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С
КОРРЕКЦИЕЙ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ**

О. А. Плахтий, аспирант

**ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ТРИФАЗНОГО ВИПРЯМЛЯЧА З
КОРЕКЦІЄЮ КОЕФІЦІЄНТА ПОТУЖНОСТІ**

О. А. Плахтій, аспірант

**DYNAMIC MODEL OF ACTIVE THREE PHASE RECTIFIER WITH POWER FACTOR
CORRECTION**

A.Plakhtiy, PhD student

В статье представлена дискретная динамическая модель активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности. Достоинством предложенной модели является возможность исследований влияния управляющих коммутационных функций, реализуемых системой управления, на электродинамические процессы в преобразователе. Представлены результаты исследований предложенной модели, выполненные в программном пакете Matlab.

Ключевые слова: трехфазный активный выпрямитель, коррекция коэффициента мощности, динамическая модель.

У статті представлена дискретна динамічна модель активного трифазного випрямляча з корекцією коефіцієнта потужності. Перевагою запропонованої моделі є можливість дослідження впливу комутаційних функцій системи керування на електродинамічні процеси в перетворювачі. Представлені результати дослідження запропонованої моделі, проведені в програмному пакеті MATLAB.

Ключові слова: трифазний активний випрямляч, корекція коефіцієнта потужності, динамічна модель.

The article presents the discrete dynamic model of a three-phase active rectifier with power factor correction. This type of converter allows implementation of following options: power factor correction, sinusoidal input current, eliminating harmonic in input current, regulation of the output voltage of the rectifier, energy recovery in the network. Analysis of electromagnetic processes requires creation of a dynamic model of the converter. The dynamic model allows analyzing steady-state and transient processes, obtaining static and dynamic characteristics of the rectifier. Switching power converters can be considered either as discrete elements of automatic control systems, either as a continuous linear element. However, worth noting that by its nature the PWM rectifier is a nonlinear discrete element and its consideration as a discrete dynamical system is more accurate approach. The advantage of the proposed discrete model is the ability to research the influence of control switching functions on the electrodynamic processes in the converter.

Key words: three-phase active boost rectifier, power factor correction, dynamic model.

Введение

Применяемые в составе выпрямительных агрегатов тяговых подстанций постоянного тока диодные и тиристорные выпрямители не соответствуют

требованиям международных стандартов IEC 61000-3, IEEE 519, EN 61000-3-2 электромагнитной совместимости в части эмиссии высших гармоник тока. Кроме этого данные выпрямительные установки не

обеспечивают возможности реализации рекуперации энергии в питающую сеть, что снижает энергоэффективность данных преобразователей. Внедрение активных трехфазных выпрямителей с коррекцией коэффициента мощности (далее АВН) позволит решить проблемы электромагнитной совместимости, повышения коэффициента мощности, а также реализации рекуперации энергии в питающую сеть [1, 2].

Анализ электромагнитных процессов, протекающие в АВН, требует создания математической и динамической модели преобразователя. Математическая модель позволяет проводить анализ установившихся и переходных процессов, получения статических и динамических характеристик преобразователя, синтеза замкнутых систем автоматического регулирования, а также анализ устойчивости работы преобразователя и его системы управления.

Анализ последних исследований

При исследовании динамических свойств импульсные преобразователи энергии можно рассматривать либо как дискретные (импульсные) элементы систем автоматического регулирования (САР), либо как непрерывный линейный элемент САР. Известен подход сведения дискретных математических моделей преобразователей к эквивалентным непрерывным моделям [3, 4]. Данный подход основан на представлении силовой части преобразователя и его системы управления в виде непрерывных звеньев САР. Описание активного

выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности в виде линейного элемента САР приведено в ряде работ [2, 3]. Однако стоит отметить, что по природе физических процессов, протекающих в АВ, данный преобразователь является нелинейным дискретным элементом САР и рассмотрение его в виде дискретной динамической системы является более точным подходом. Это позволяет получить в модели наиболее близкое к реальности отображение протекающих в преобразователе переходных процессов, а также исследовать влияние коммутационных функций системы управления на работу преобразователя.

Целью данной статьи является описание результатов исследований представленной дискретной динамической модели активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности выполненных в пакете Matlab.

1. Математическая модель активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности

Схема замещения исследуемого активного трехфазного выпрямителя представлена на рисунке 1. В состав данного преобразователя входит шесть полностью управляемый IGBT-ключей с параллельными диодами (VT1-VT6); три входных дросселя L_a , L_b , L_c ; выходной конденсатор C ; три входных сопротивления R_a , R_b , R_c имитирующие активное сопротивление входных дросселей.

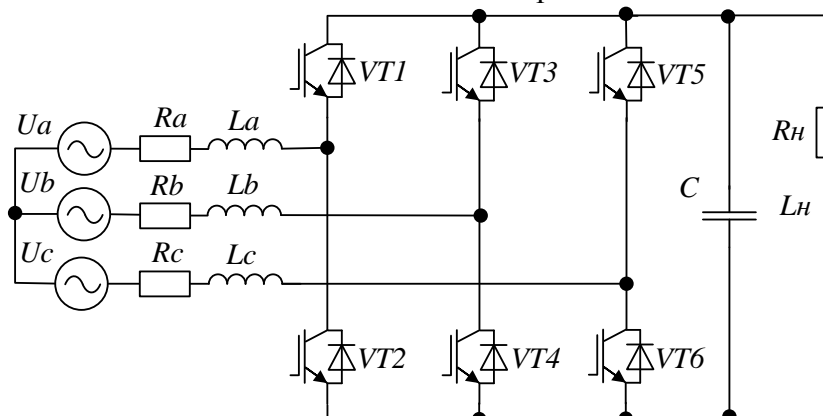


Рис. 1 – Схема замещения активного повышающего выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности

На данный момент существует несколько принципиально разных систем управления АВН. Автором предложена гистерезисная система управления, реализующая высокие энергетические

показатели, а также коэффициент мощности близкий к единице, как в режиме выпрямления, так и в режиме рекуперации [4, 5]. Структурная схема предложенной системы управления приведена на рис.2

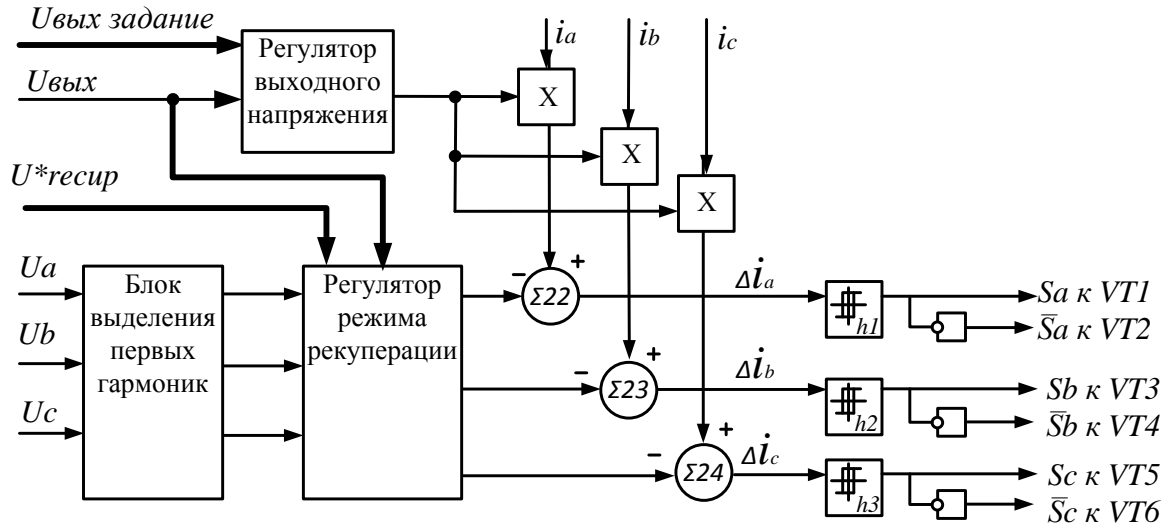


Рис.2 – Гистерезисная система управления активного трехфазного выпрямителя

Система управления формирует управляющее воздействие на ключи АВН. При этом вводится понятие коммутационных функций (далее КФ). Коммутационная функция описывает состояние ключей плеча преобразователя. Если значение КФ равно

единице, то включен ключ анодной группы; а если КФ равно нулю, то включен ключ катодной группы. Коммутационные состояния ключей активного выпрямителя приведены на рис.2.

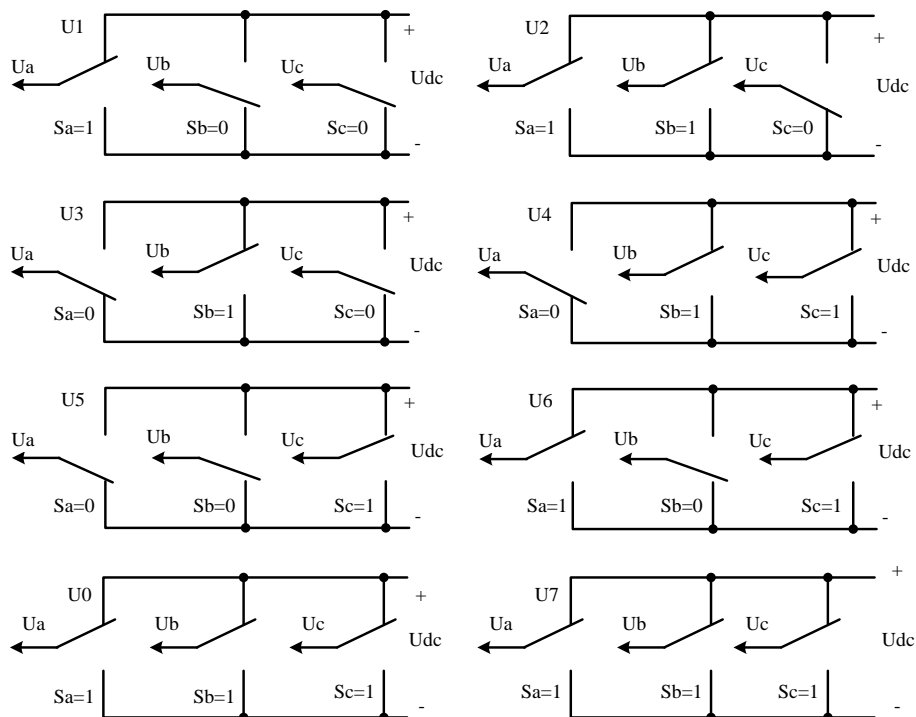


Рис. 2 – Коммутационные состояния ключей активного выпрямителя

Векторная диаграмма коммутационных состояний ключей АВН приведения в $\alpha\beta$ -системе координат представлена на рис. 3.

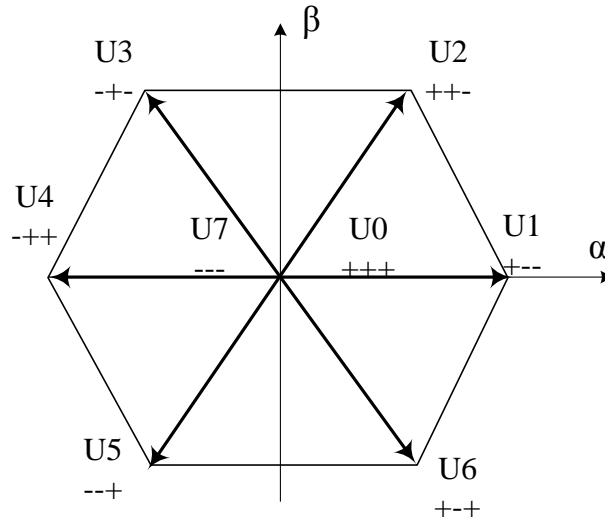


Рис. 3 – Векторная диаграмма напряжений АВН в $\alpha\beta$ -системе координат

Исходя из коммутационных состояний ключем АВН, соотношение коммутационными функциями и линейными (межфазными) напряжениями, может быть представлено в виде следующих уравнений:

$$u_{DC} = \begin{cases} (S_A - S_B) \cdot u_{AB} \\ (S_B - S_C) \cdot u_{BC} \\ (S_C - S_A) \cdot u_{CA} \end{cases} \quad (7)$$

При этом удобно связать значение фазных напряжений питания и напряжения в звене постоянного тока:

$$u_{DC} = \begin{cases} f_a \cdot u_{AN} \\ f_b \cdot u_{BN} \\ f_c \cdot u_{CN} \end{cases} \quad (10)$$

Где:

$$f_a = \frac{2S_A - (S_B + S_C)}{3} \quad (13)$$

$$f_b = \frac{2S_B - (S_A + S_C)}{3} \quad (14)$$

$$f_c = \frac{2S_C - (S_A + S_B)}{3} \quad (15)$$

Переменные f_a, f_b, f_c могут принимать значения $0, \pm 1/3, \pm 2/3$.

Система уравнений, описывающая баланс напряжений в преобразователе приведена в системе уравнений ниже.

$$\begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_c \\ u_c \\ u_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее зависимость выходного напряжения от величины фазных токов с учетом мгновенных значений коммутационных функций приведено ниже.

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_{ca} + S_b i_{cb} + S_c i_{cc} - i_{dc} \quad (17)$$

Динамическая модель АВН

Вышеприведенные уравнения (7-17) преобразовать в динамическую модель, активной трехфазного выпрямителя можно которая приведена на рисунке 4.

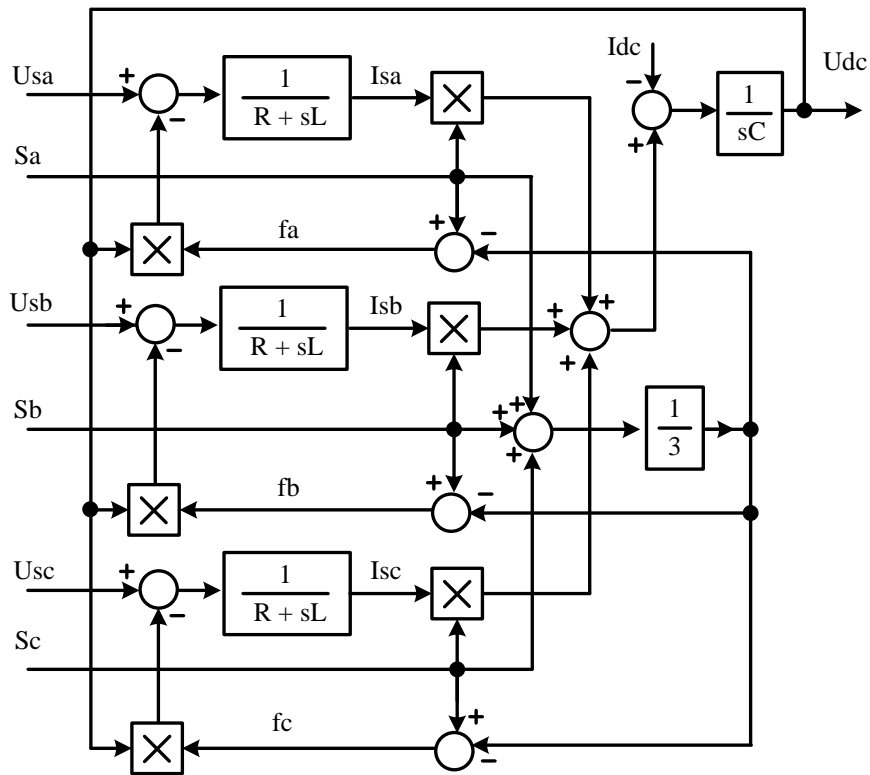


Рис. 4 –Динамическая модель активного трехфазного выпрямителя

В программе Matlab была создана дискретная динамическая модель АВН. Параметры модели: La=0,2мГн; Ra=0,01 Ом; C=6мкФ; Rн=2 Ом; Lн=20 мГн.

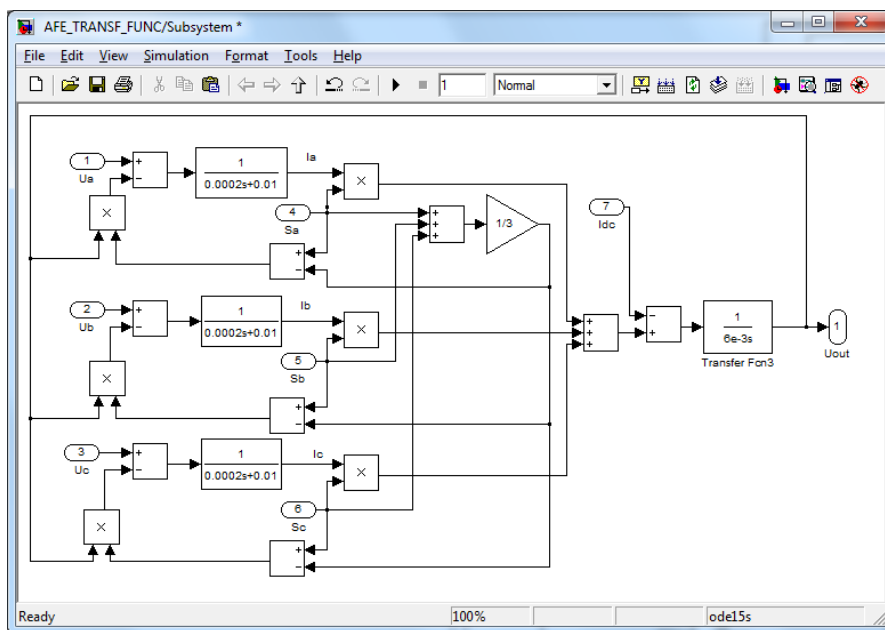


Рис. 5 —Дискретная динамическая модель АВН

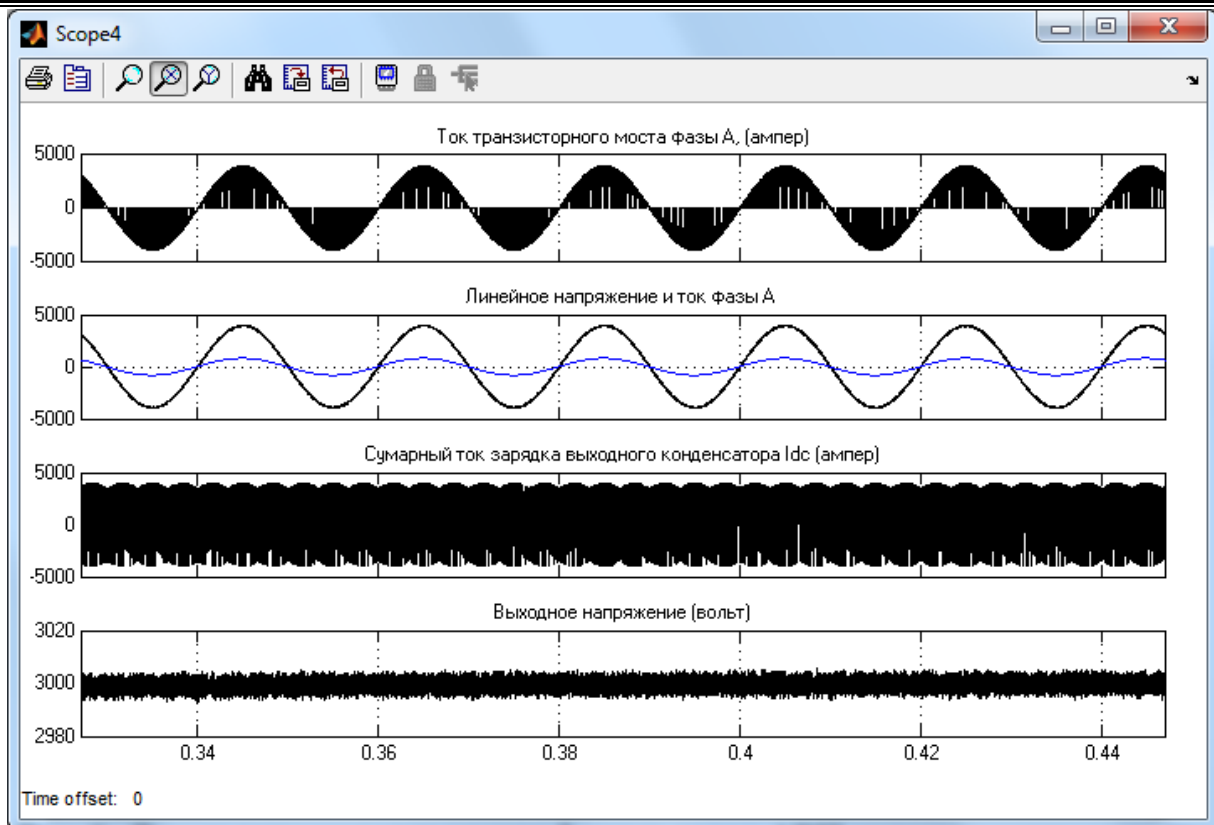


Рис. 6 –Результаты моделирования фазных токов АВН при математическом и имитационном моделировании

Из проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

- активный выпрямитель обеспечивает коррекцию коэффициента мощности в режиме выпрямления;
- амплитуда пульсаций выходного напряжения менее 10В.

Выводы:

В статье представлены исследования дискретной динамической модели активного трехфазного выпрямителя. Достоинством

предложенной модели по сравнению с непрерывной моделью является то, что она учитывает коммутационные функции, полученные из системы управления. Адекватность модели подтверждено результатами имитационного моделирования.

Разработанная модель далее будет использована для анализа устойчивости активного выпрямителя, как элемента системы автоматического регулирования.

Список литературы:

1. Maswood A.I, A novel variable hysteresis band current control of three-phase three-level rectifier with constant switching frequency [Текст], IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, Issue , 12-16 June 2005, С. 23- 27.
2. Казачковский Н.Н. Способ управления векторным релейным регулятором тока в электро- приводах с ШИМ [Текст] / Н.Н. Казачковский, Д.В. Якупов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2004. – Вип. 3/2004 (26). – С. 46-49.
3. Казачковский Н. Н. Управление активным выпрямителем с широтно-импульсной модуляцией при возмущениях со стороны нагрузки [Текст] / Н.Н. Казачковский., Д.В. Якупов // Вісник Приазовського державного технічного університету: Зб. наук. пр.– Маріуполь, – Вип. 18, 2008. –С. 40-43.

4. Плахтий А.А. Гистерезисная система управления активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности [Текст] // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2013: – Вип. 4. – С. 82-88.

5. Щербак Я.В. Исследование режима рекуперации активного трехфазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности [Текст] / Я.В. Щербак, А.А. Плахтий // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2012: – Вип. 143. – С. 188-194.

Рецензент д-р техн. наук, профессор Я.В.Щербак

Плахтий Александр Андреевич, Аспирант кафедры автоматизированных систем электрического транспорта, Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Контактный телефон: +38 093 9176020, E-mail: 83et@mail.ru

Plakhtiy Alexandr Andrievich, Phd. Student, Chair Automated control systems of railway transport, Ukrainian State Academy of railway transport, Contact phone: +38 093 9176020, E-mail: 83et@mail.ru

Плахтій Олександр Андрійович, Аспірант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний телефон: +38 093 9176020, E-mail: 83et@mail.ru

Стаття поступила 20.04.2015

УДК 681.518.3

COMPUTER IMPLEMENTATION OF THE INDIRECT METHOD FOR ESTIMATING OF THE PREDICTED MICROROUGHNESSES

PhD Technical Science A.F. Ienikieiev

КОМП'ЮТЕРНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕПРЯМОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ МІКРОНЕРІВНОСТЕЙ, ЩО ПРОГНОЗУЮТЬСЯ

Канд. техн. наук О.Ф. Єнікєєв

КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОСВЕННОГО МЕТОДА ОЦЕНИВАНИЯ ПРОГНОЗИРУЕМЫХ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ

Канд. техн. наук А.Ф. Еникеев

It is offered the computer implementation of the method for indirect estimation of the microroughnesses according to the measurement deviations of the rotational speed of the grinding wheel. It is developed the mathematical model of the process of diamond grinding and it is formulated requirements for measurement accuracy on the basis of the analysis of its output signal. It is developed the information technology of the separation of the constituents into the deviation signal. It is offered the method and device for compensation of the kinematic error of the primary converter.

Keywords: *method of measuring, deviations, mathematical model, kinematic error.*

Запропоновано комп'ютерну реалізацію метода для непрямого оцінювання мікронерівностей за даними вимірювань девіацій швидкості обертання шліфувального круга. Розроблено математичну модель процесу алмазного шліфування та на основі аналізу її вихідного сигналу сформульовано вимоги за похибкою вимірювань. Розроблено інформаційну технологію поділу внесків подач до сигналу девіацій. Запропоновано метод та пристрій для компенсації кінематичної похибки первинного перетворювача.

Ключові слова: метод вимірювань, девіації, математична модель, кінематична похибка.

Предложена компьютерная реализация метода для косвенного оценивания микронеровностей по данным измерений девиаций скорости вращения шлифовального круга. Разработана математическая модель процесса алмазного шлифования и на основе анализа ее выходного сигнала сформулированы требования по точности измерений. Разработана информационная технология раздела вкладов подач в сигнал девиаций. Предложен метод и устройство для компенсации кинематической погрешности первичного преобразователя.

Ключевые слова: метод измерений, девиации, математическая модель, кинематическая ошибка.

Preface. It is offered the indirect method of estimating of the predicted microroughnesses of the machined surface of workpieces with diamond grinding on the deviation signal of the rotational speed wheel. Standard levels of deviations are set on the base of the possible «qualitetov» of the purity workpieces surface and are entered into the databank of the computer system in the form of regulations. In this case deviations are the source of the indirect information about microroughnesses, and the signal which contains the information about the deflection of the predicted «qualitetov» purity from the adjusted value using the processing program of the batch workpieces. The implementation of the proposed ideas allows building a computer system in order to receive the predicted quality of the machined surface of workpieces without direct changes of its microroughnesses.

The aim and task of the research work is. The object of the article is the computer implementation of the indirect method for estimating of the predicted microroughnesses. The progress of this object is provided by solving of such problems:

- to establish requirements for metrological characteristics of the measuring device based on the output analysis of a mathematical model of the process of diamond grinding;

- to realize the using of the information measuring device and analyze its efficiency;

- to develop the information technology of the instantaneous speed signal processing of the wheel rotation.

The hardware and software estimation of the predicted microroughnesses is a logical connection of rotation detector, measuring converter, microcontroller device. The output signals are the given values of the transverse and longitudinal feed of the grinding wheel.

The simulation process of diamond grinding.

The requirements for metrological characteristics of the measuring converter are formulated by analyzing the output signal of a mathematical model of the process of diamond grinding. The diamond tool feeds were used in its development as input signals. The output signal of the model is the cutting force of the workpieces material. The expression for the transfer function that links the transverse feed with the radial component of the cutting force was obtained considering the dynamics of the cutting process of the workpieces material, the elastic deformation of the kinematic scheme of the grinding machine and the diamond tool linear wear [1, 2]

$$W_1(p) = \frac{K_1(1 - e^{-pt_1})}{1 + K_1(1 - e^{-pt_1}) \left[pK_2 \left(\frac{p^2}{\Omega^2} + \frac{2\beta_1 p}{\Omega} + 1 \right) + \frac{K_3}{p\tau} (1 - e^{-p\tau}) \right]}, \quad (1)$$

where K_1 – the transfer coefficient of the cutting process of the workpieces material on the coordinate S_1 , β_1 – the damping

coefficient, K_2 – the state stiffness of the machine design, K_3 – the grinding wheel wear coefficient, τ – time rotation of the wheel, t_1 –

the front or back wheel move time, Ω – the resonant frequency of the grinding machine design.

The expression for the transfer function that links the transverse feed with the tangential component of the cutting force was obtained

$$W_2(p) = \frac{K_5 K_4 (1 - e^{-p t_1})}{p [K_5 + K_4 (1 - e^{-p t_1})]}, \quad (2)$$

where K_4 – the transfer coefficient of the cutting process of the workpieces material on the coordinate S_2 , K_5 – the state stiffness of the machine design.

considering the dynamics of the cutting process of the workpieces material, the elastic deformation of the kinematic scheme of the grinding machine and the diamond tool linear wear [1, 3]

The input signal considering the front and back grinding wheel move was depicted by such expression (similar presentation for longitudinal feed) [4]

$$S_1(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } -\pi < \Omega t < -\pi + \alpha, -\alpha < \Omega t < \alpha, \pi - \alpha < \Omega t < \pi, \\ S_1, & \text{if } \alpha < \Omega t < \pi - \alpha, \\ -S_1, & \text{if } -\pi + \alpha < \Omega t < -\alpha, \alpha > 0, 0 < \alpha < 0.5\pi. \end{cases} \quad (3)$$

The radial and tangential components of the cutting force of the workpieces material are orthogonal in their effect on the grinding wheel. The following equation for their summation was

$$F(p) = \sqrt{W_1^2(p) S_1^2(p) + W_2^2(p) S_2^2(p)}. \quad (4)$$

The cutting force of the workpieces material is a source of rotary oscillations. The shaft with the grinding wheel was given in the form of the mechanical system with one degree

obtained on the basis of the linearity of the Laplace transform and the complementary theorem of addition [4]

of freedom. The movement of the wheel is described by the second order differential equation [5]

$$J \varphi''(t) + \beta_2 \varphi'(t) + \gamma_1 \varphi(t) = R F(t), \quad (5)$$

where J – the inertia moment of the circle, β_2 – the damping coefficient, γ_1 – the stiffness of the shaft, R – the wheel radius.

workpieces material was obtained after the procedure of normalization and transformations [6]

The transfer function that links deviations and the cutting process of the

$$W_3(p) = \frac{R t_1 \gamma_1 p}{J t_1 p^2 + \beta_2 t_1 p + \gamma_1}. \quad (6)$$

The block diagram of the diamond grinding process was made by the expressions (1), (2), (4) and (6) (Fig. 1). The deviation schedule of the grinding wheel rotation speed within its one turn was prepared as a result of simulation (Fig. 2). It was set that the amplitude

of deviations didn't exceed 0.05 signal amplitude of the instantaneous speed. So the procedure of the signal deviations measurements requires the development of high-precision methods and suitable technical means.

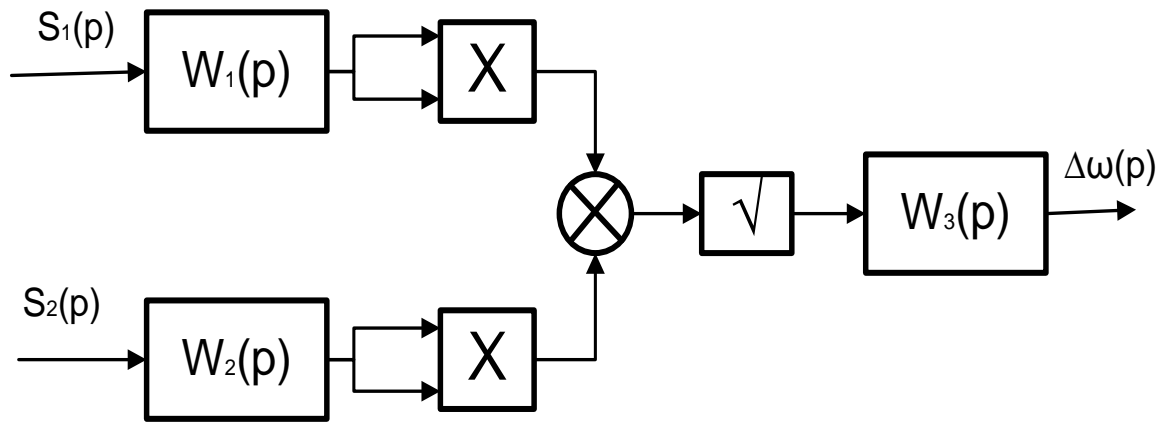


Fig. 1 Block diagram of the diamond grinding process

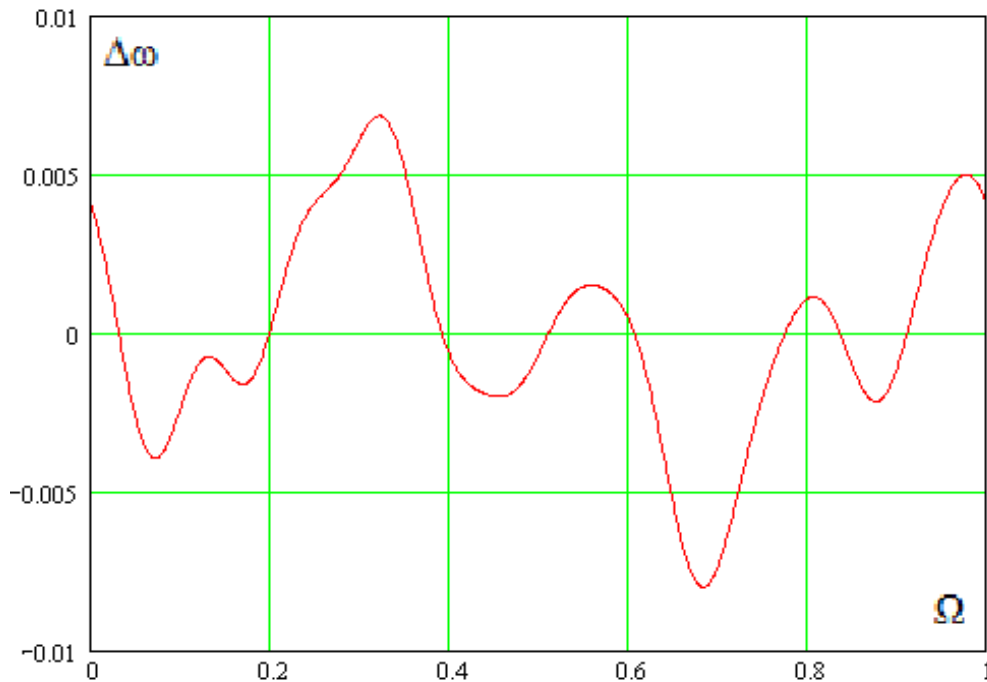


Fig. 2 Output signal of the model of the diamond grinding process

Measuring converter.

Its development was started from the analysis of components of the sensor error:

- the error recovery of the analog signal from discrete samples which is determined for its frequency representation in this way [7]

$$\delta_1 = \frac{t_0}{8} \sqrt{0.1 \sum_{i=1}^{10} \Omega_i^4} 100\%, \quad (7)$$

where t_0 – a set of discretization; Ω_i – harmonic of frequency representation of the deviation signal;

production of gear wheels of different classes of accuracy [8] and it is given in Table 1. This expression is used to evaluate the kinematic error

- the cinematic error of the primary converter which is defined by the example of research tolerances for the manufacturing

$$\delta_2 = \frac{\Delta m}{m} 100\%, \quad (8)$$

where Δm – the tolerance for the kinematic error of the gear wheel, m – module;

- converter.

the dynamic error of the primary

Table 1 – Numerical data of the kinematic error

Accuracy class of gears	4	5	6	7	8
$\delta_2, \%$	0	1	2	2	4
	.80	.25	.00	.75	.00
Error of deviation measurements, %	1	2	4	5	8
	6.0	5.0	0.0	5.0	0.0

Data of Table 1 permit to make a conclusion: the problem of the precision measuring deviations is to develop technical means for reducing the magnitude of the kinematic error in manufacturing of the primary converter. One of the possible ways to solve this problem is to perform certifications of the primary converter. The results of it are corrections which the measuring converter takes into account to determine the deviation signal. The synchronization device that has the appropriate primary converter is also a part of the measuring converter.

To compensate the kinematic error the author proposes a method of multichannel measurements of time intervals that are formed

$$\Delta_1 = \frac{1}{z} \sum_{i=0}^{z-1} [\Delta\omega(i\Delta t + \sigma) - \Delta\omega(i\Delta t)], \quad (9)$$

where z – the number of marks of the primary converter, σ – the mean square deviation of temporary displacement of discrete samples is defined on the basis of the

by one mark of the primary converter and match to the requirements for a full rotation of its shaft. Using the method of measuring the instantaneous speed the kinematic error of the primary converter has no effect on the duration of the intervals formed by time. Data of Table 1 and this conclusion prove the correctness of the proposed method.

The dynamic error of the primary converter is the time shift of discrete samples of time realization of deviations which appear as a result of the kinematic deviation. It was conducted the estimation of the dynamic error of shifts in time of the discrete samples of signal deviations. The absolute value of the dynamic error is defined as follows [9]

manufacturing tolerances of the primary converter.

The sum is replaced by the integral up to the magnitude of the second order minority concerning the dynamic error of the primary converter [9]

$$\Delta_1 = \frac{1}{O_0} \int_0^{\sigma} [\Delta\omega(\Omega t + \Omega\sigma) - \Delta\omega(\Omega t)] dt. \quad (10)$$

For a harmonic signal this expression after mathematical transformation is in the form of

$$\Delta_{1,i} = \frac{2A_i}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma) \sin(i\Omega\sigma). \quad (11)$$

The relative error of the harmonic signal was obtained in the expression

$$\delta_i = \frac{2}{\pi} \sin(\varphi_i - 0.5i\Omega\sigma) \sin(i\Omega\sigma). \quad (12)$$

The dynamic error of the primary converter is determined taking into account the contributions of the harmonic components to the deviation signal [10]

$$\delta_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (A_i \delta_i)^2}{\sum_{i=1}^{10} A_i^2}}. \quad (13)$$

The results of calculations of the dynamic error of the primary converter are given in Table 2.

Table 2 – Numeral data of the dynamic error

Accuracy class of the primary converter					
Error of deviation measurement, %	.10	.80	.40	.90	4.10

The gist of the method, proposed by the author for the hardware compensation of the kinematic error of the primary converter, consists in the following [11]. The output signal of the primary converter using the counter and decoder is converted into some impulse sequences, which correspond to the moments of passing near the sensing element of the converter of one mark and which are applied to the input channel for the measurement of time intervals. The number of these channels as a part of this device is determined by the number of marks of the primary converter. Hardware implementation of channels for the measurement was made on the basis of the time discretization method. The elimination of the mutual overlapping of the output signal channels when they are combined in the measurement information signal for the digital processing device is performed using counters. The volume of the latter and the frequency of a

generator are selected so that the counter overflow can be performed for a time slightly less than the average period of pulse pattern. So the calibrated time interval is excluded from the measurement information of each channel. The combination of the output signals of channels into the signal of the measurement information is performed using the logical scheme OR.

The original device for measuring instantaneous speed of the grinding wheel rotation was designed using this method (Fig. 3). It is considered [12]. Fig. 4 illustrates : PC – primary converter; D – decoder; G – generator; N – the number of channels for measurement; AND1,..., AND4 – logic circuitry; N_x – output code; OR1, OR2 – logic circuitry; C1,..., C4 – pulse counter; PSh – pulse shaping; T1,..., T3 – trigger; DL – delay line. The device for measurement has two channels, which measure the duration of the pulses of the direct and inverse outputs T1.

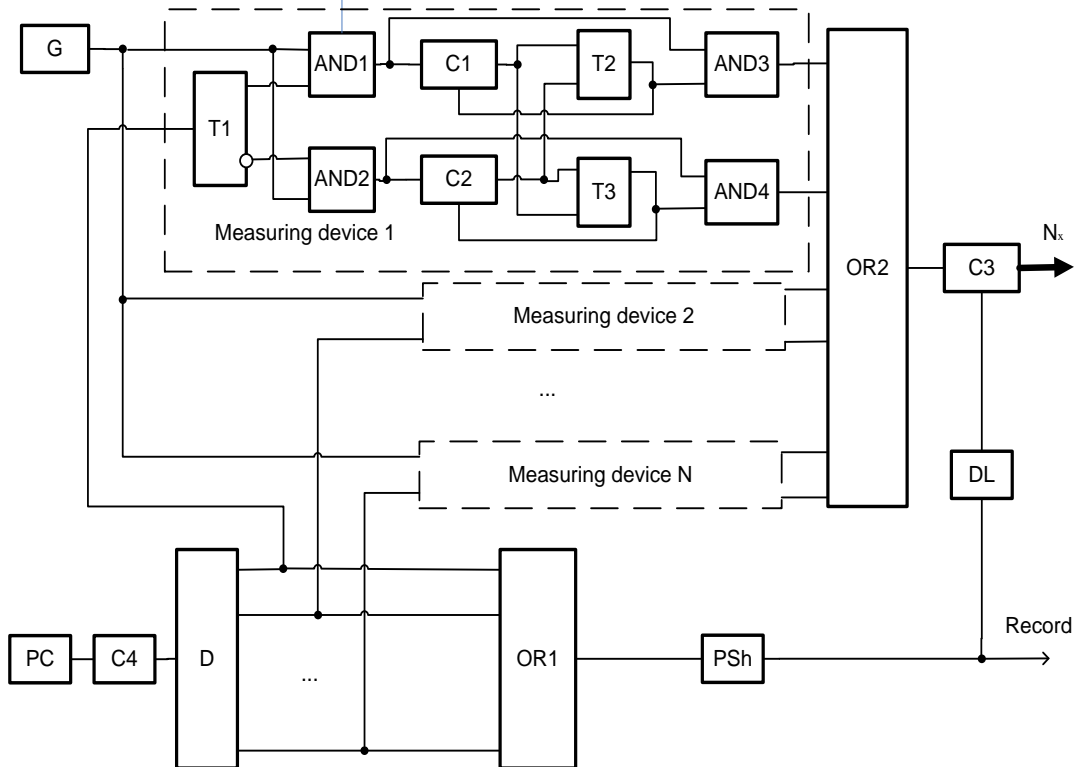


Fig. 3 Compensation device of the kinematic error

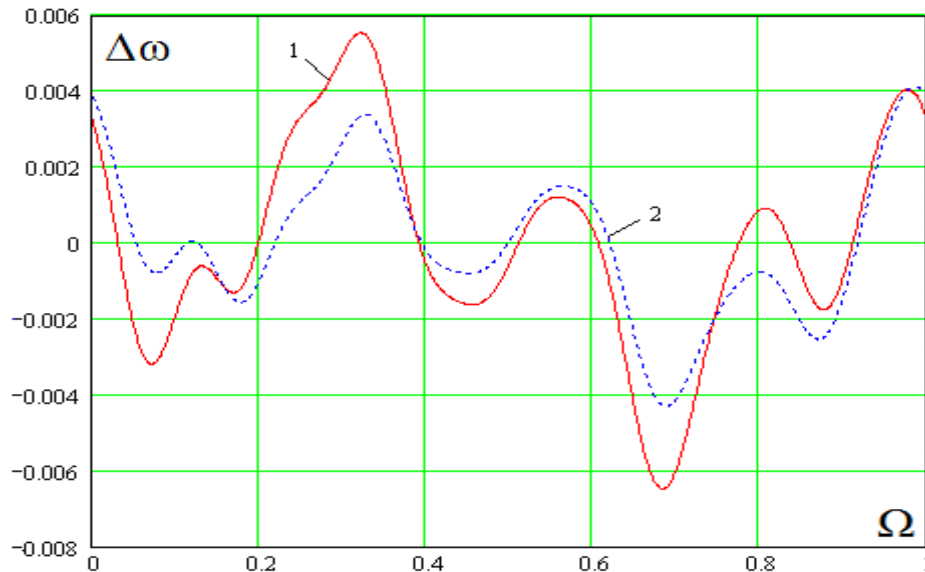


Fig. 4 Graphs of the constituents of the deviation signal:
 1 – transverse feed, 2 – longitudinal feed

The measurement information signal for the device is formed by the scheme OR2. The counter C3 converts this signal into a digital code. The block PSh generates a recording signal code in the register device 5 and using the block D converts the counter C3 to the zero state.

Information technology of deviation signal processing. The separation of the constituents of the deviation signal was

$$\gamma_1 = \frac{\Delta\omega_1}{\Delta\omega} = 0.81 \quad \text{and} \quad \gamma_2 = \frac{\Delta\omega_2}{\Delta\omega} = 0.586.$$

Algorithm of the digital processing device of the signal speed was developed based on the tolerance control:

- to present temporal implementation of the deviation signal after the normalization of its parameters by a limited Fourier series;
- to determine the acting value of the deviation signal;
- to get normalized values of feeds by multiplying weight coefficient;
- to analyze the data bank of standard levels of deviation amplitudes and if necessary to form signals of feed adjustment.

Conclusion. It is offered the computer implementation of the indirect method for estimating of the predicted microroughnesses of the machined surface of workpieces. It was

developed on the basis of their frequency representation. Graphs of the constituents of the deviation signal were prepared as a result of simulation (Fig.4). These graphs were prepared during the analysis of the mathematical model of the diamond grinding process using such constituents of the deviation signal : $S_1(t) = 0$, $S_2(t) = 0$. It was determined the weight coefficients of the separation of the constituents of the deviation signal

improved the mathematical model of the process of diamond grinding, which is characterized by two coordinates, the use of feed diamond tool as input signals and deviations as the output signal. For the first time it was developed the method and the information technology of the separation of the constituents of the grinding wheel of the deviation signal on the basis of their frequency representations. First it is offered the method of measuring instantaneous speed of grinding wheel rotation which is characterized by using the hardware compensation of the kinematic error of the primary converter. It was designed the measuring design and the technology of the instantaneous speed signal.

List of references.

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. –Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с.
2. Еникеев А.Ф. Анализ модели технологического процесса алмазного шлифования / Ф.М. Евсюкова, О.В. Евсюкова, А.Ф. Еникеев, И.С. Зыков, Л.А. Шищенко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. –Харьков: Вып. 119, 2000. – С. 21 – 23.
3. Єнікєєв О.Ф. Детермінована математична модель технологічного процесу алмазного шліфування / Ф.М. Євсюкова, О.Ф. Єнікєєв, Л.О. Шищенко, А.П. Фроленко, І.С. Зиков // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: №44, 2004. – С. 16 – 23.
4. Єнікєєв О.Ф. Математичне моделювання технологічного процесу алмазного шліфування деталей з твердих сплавів / О.Ф. Єнікєєв, Г.В. Соколовська, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. Випуск 60. –К.: 2011. – С. 55 – 61.
5. Єнікєєв О.Ф. Реалізація непрямих вимірювань мікронерівностей деталей для підвищення ефективності алмазного шліфування / О.Ф. Єнікєєв, Г.В. Соколовська, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. Випуск 62. –К.: 2012. – С. 41 – 48.
6. Єнікєєв О.Ф. Перетворювач миттєвої швидкості обертання шліфувального круга / Ф.М. Євсюкова, О.Ф. Єнікєєв, Л.О. Шищенко, Р.О. Яровий // Вестник Национального технического университета «ХПИ». –Харьков: №16', 2003. – С. 42 – 48.
7. Єнікєєв О.Ф. Аналіз динамічних характеристик системи стабілізації швидкості обертання круга / О.Ф. Єнікєєв, О.В. Суботін, Р.О. Яровий // В сборнике «Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем». –Краматорск: Вып. 18, 2005. – С. 107 – 113.
8. Допуски и посадки. Справочник. / [Гл. ред. Мягков В.Д.] – Л.: Машиностроение, Часть 2, 1978. – с. 545–1032.
9. Горлач А.А. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике / А.А. Горлач, М.Я. Минц, В.Н. Чинков –К.: Техника, 1989. – 151 с.
10. Єнікєєв О.Ф. Метрологічні характеристики перетворювача миттєвої швидкості обертання шліфувального круга при алмазному шліфуванні / О.Ф. Єнікєєв, О.В. Монченко, Т.Л. Щербак // Моделювання та інформаційні технології. Випуск 63. –К.: 2012. – С. 42 – 48.
11. Еникеев А.Ф. О повышении точности измерителя флуктуаций частотно-модулированных сигналов / А.Ф. Еникеев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. –Курск: № 1, 2015. – С. 109 – 113.
12. А.с. № 1538679 (СССР). Устройство для контроля неравномерности вращения вала двигателя внутреннего сгорания / Марченко Б.Г., Борисенко А.Н., Еникеев А.Ф.

Єнікєєв Олександр Фанілович канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: 050-194-33-57, 096-245-32-83. E-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Aleksandr Ienikieiev candidate of the engineering sciences, reader in automatic systems of the electric transport, Ukrainian State University of Railway Transport, Krasnyi Lyman department, Krasnyi Lyman. Tel.: 050-194-33-57, 096-245-32-83. E-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Стаття постуила 20.04.2015

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

К-т техн. наук О.І. Семененко, аспірант Ю.О. Семененко

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

К-т техн. наук А.И. Семененко, аспирант Ю.А. Семененко

INCREASING THE EFFECIENCY OF DC TRACTION POWER SUPPLY

Ph.D., O.I. Semenenko, postgraduate Y.O. Semenenko

В статті розглянуто питання підвищення ефективності системи тягового електропостачання постійного струму шляхом застосування перетворювальних пунктів, які розташовані в середній частині міжпідстанційної зони для забезпечення підживлення контактної мережі. Перетворювальні пункти пропонується створювати на основі чотирифазних понижувальних ШПП, що надає цілий ряд переваг, основні з яких полягають у зниженні втрат енергії в процесі її передачі та підвищенні якості енергії живлення електрорухомого складу постійного струму.

Ключові слова: перетворювальний пункт, багатофазний широтно-імпульсний перетворювач, пульсації струму і напруги.

В статье рассмотрен вопрос повышения эффективности системы тягового электроснабжения постоянного тока путем применения преобразовательных пунктов, которые расположены в средней части межподстанционной зоны для обеспечения подпитки контактной сети. Преобразовательные пункты предлагается создавать на основе четырехфазных понижающих ШПП, что предоставляет целый ряд преимуществ, основные из которых заключаются в снижении потерь энергии в процессе ее передачи и повышении качества энергии питания электроподвижного состава постоянного тока.

Ключевые слова: преобразовательный пункт, многофазный широтно-импульсный преобразователь, пульсации тока и напряжения.

The article deals with the issue of increasing the effectiveness of the traction power supply DC converter through the use of items that are located in the middle of the area between substations to ensure the replenishment of contact network. Such items must be powered from traction substations in order to reduce energy loss along the lines of high voltage. It is shown that for EMC power line items with the means of communication, signaling and automatic lock is advisable to use DC power. At the present level of development of transformational technology converting paragraphs proposed to be created on the basis of reducing pulse-width converters IGCT - advanced Lockable thyristors, which have a relatively high speed. In addition, through a comparative analysis found that the pulse width must be four-phase inverter, and its control keys must work alternately, creating a continuous process from the source of current consumption. This solution provides a number of advantages, the main of which are to reduce energy loss during transmission and improve the quality of power supply DC electric rolling stock.

Keywords: conversion point, polyphase pulse width, converter ripple current and voltage.

Вступ. Система тягового відносно низький рівень напруги 3,3 кВ, що електропостачання постійного струму має не дозволяє суттєво збільшувати

навантаження на контактну мережу залізниць. Традиційні методи зниження втрат при передачі енергії до електричного рухомого складу (ЕРС), які підвищують електропровідність мережі, не достатньо ефективні. При великих навантаженнях застосування в контактній мережі постійного струму указаних заходів не забезпечує необхідного рівня напруги у середній частині зони між тяговими підстанціями згідно вимог [1], що заважає подальшій інтенсифікації руху поїздів та впровадженню швидкісного руху.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Радикальним рішенням проблеми є перехід до системи тягового електропостачання постійного струму напругою 6-24 кВ і технічна реалізація цього кроку не викликає особливих труднощів, але не вирішеним залишається питання побудови ефективного ЕРС постійного струму на таку напругу [2-4]. Тому поки що залишається лише можливість удосконалення існуючої системи.

Одним із таких рішень є підвищення рівня напруги по всій міжпідстанційній зоні за допомогою регульованих вольтододавальних пристроїв, які розміщують на тягових підстанціях і виконують, наприклад, на базі керованих випрямлячів [5]. Щоправда, уже при відстані між підстанціями 25-30 км застосування цих пристроїв виявляється недостатньо ефективним, бо в такому випадку для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачі швидкісного ЕРС вихідна напруга підстанцій в деякі моменти повинна бути навіть вище 3,7 кВ, що призводить до прискореного старіння ізоляції тягових двигунів.

Перспективнішим шляхом вирішення вказаної вище проблеми є передача електроенергії при підвищеній напрузі до віддалених від тягових підстанцій ділянок контактної мережі. Реалізувати такий варіант можливо застосуванням перетворювальних пунктів (ПП), які потрібно розташувати в середній частині міжпідстанційних зон [6-9]. До ПП електрична енергія подаватиметься від тягових підстанцій по лініях підвищеної напруги, а в контактну мережу від цих пунктів поступатиме напруга 3,3 кВ постійного струму. В результаті будемо мати значно

менші сумарні втрати енергії і необхідний для якісного живлення ЕРС рівень напруги по всій довжині міжпідстанційної зони.

Один із варіантів реалізації ПП має трансформаторно-випрямну структуру і передбачає живлення від мережі трифазного змінного струму 35 або 10 кВ, яка проходить вздовж залізниці від тягових підстанцій [6]. При великій потужності ПП, що складає 6-10 МВт, робота лінії змінного струму може призводити до створення електромагнітних перешкод функціонуванню засобів СЦБ та погіршувати якість енергії живлення ЕРС. Тому така лінія повинна виконуватись на окремих опорах, розташованих на необхідній відстані від тягової мережі постійного струму, ліній зв'язку та СЦБ.

Щоб уникнути додаткових витрат на спорудження лінії та покращити якісні показники напруги живлення ЕРС, можна виконати ПП на базі понижувального широтно-імпульсного перетворювача (ШПП) з живленням від джерела постійного струму підвищеної напруги [7-9]. За цим варіантом у якості лінії живлення можуть бути використані підвішені на опорах контактної мережі алюмінієві проводи 2А-185, які зазвичай застосовують як підсилюючі в контактній мережі, зворотним провідником буде рейкова мережа.

Визначення мети та задачі досліджень. Для прийняття рішення щодо вибору найефективнішого варіанта реалізації ПП потрібно проаналізувати основні показники роботи ШПП з різною структурою та напругою живлення, розглянути можливість застосування таких ПП в умовах існуючих ділянок контактної мережі постійного струму та при спорудженні нових.

Основна частина. Як сказано було вище, для тягової мережі постійного струму при відстані між підстанціями більше 25 км і значних навантаженнях з метою зменшення втрат енергії та забезпечення необхідного рівня напруги пропонується обладнати ПП в середній частині міжпідстанційної зони. При підвищеній напрузі живлення ПП для мінімізації втрат доцільно використати одноступеневе перетворення енергії шляхом застосування багатофазного понижувального ШПП (рис. 1).

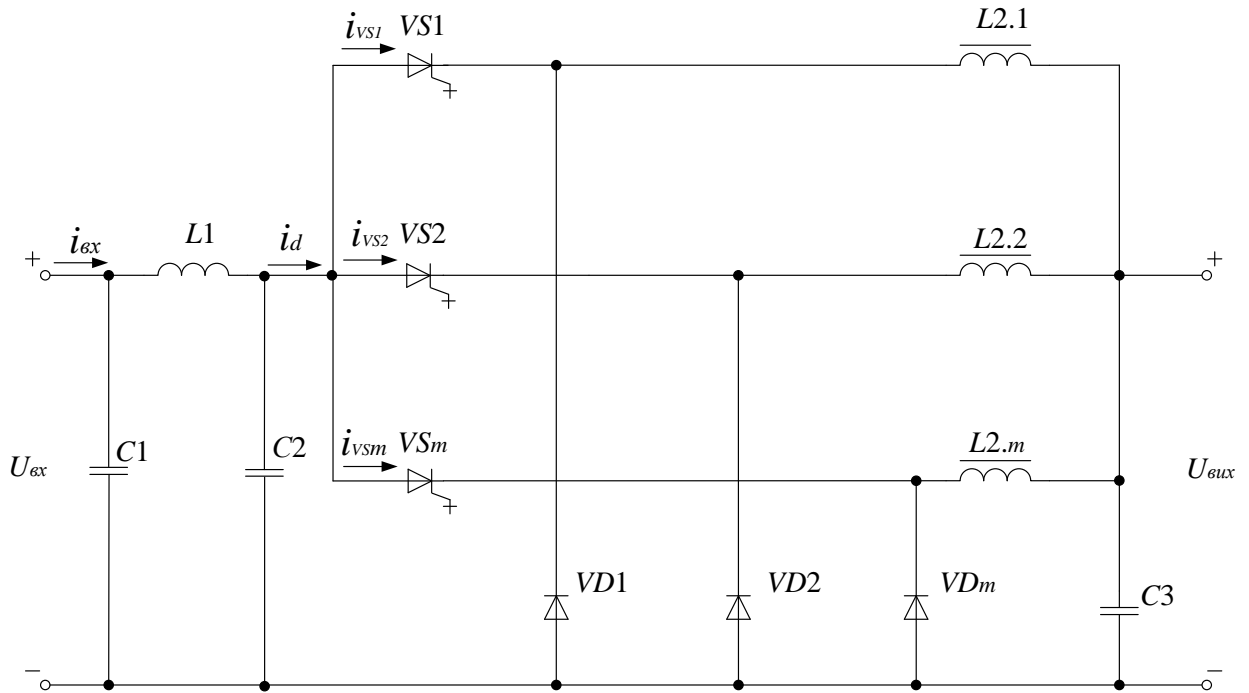


Рис. 1. Схема багатофазного широтно-імпульсного перетворювача

Крім загального вхідного фільтра кожна із фаз перетворювача має свій керований ключ $VS1-VSm$, зворотний діод $VD1-VDm$ та дросель вихідного фільтра $L2.1-L2.m$, який реалізовано як багатофазний зрівняльний реактор на загальному осерді. З урахуванням розміщення ШПІ в умовах стаціонарного ПП, тобто коли немає особливих обмежень за масою та розмірами конструкції перетворювача, у якості

керуваних ключів краще застосувати високовольтні $IGCT$ – сучасні двоопераційні тиристори, які мають відносно високу швидкодію при невисокій у порівнянні з $IGBT$ вартості. На виході ШПІ встановлено загальний для всіх фаз конденсатор фільтра $C3$, де виділяється вихідна напруга $U_{вих}$ як середнє арифметичне з вихідних напруг фаз [8]:

$$U_{вих} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_{вих.i} , \quad (1)$$

де $U_{вих.i}$ – вихідна напруга i -ї фази;
 m – число фаз перетворювача.

При жорстко фіксованому співвідношенні між напругами на виході та вході ШПІ, що означає і незмінний коефіцієнт заповнення імпульсів τ (для понижувального ШПІ $\tau = U_{вих}/U_{вх}$), можна

значно зменшити пульсації вхідного струму, використавши переваги багатофазного перетворювача. Для цього тривалість ввімкненого стану ключів різних фаз повинна дорівнювати m -ій частині періоду T , їх часовий зсув повинен мати таке ж значення (рис.2).

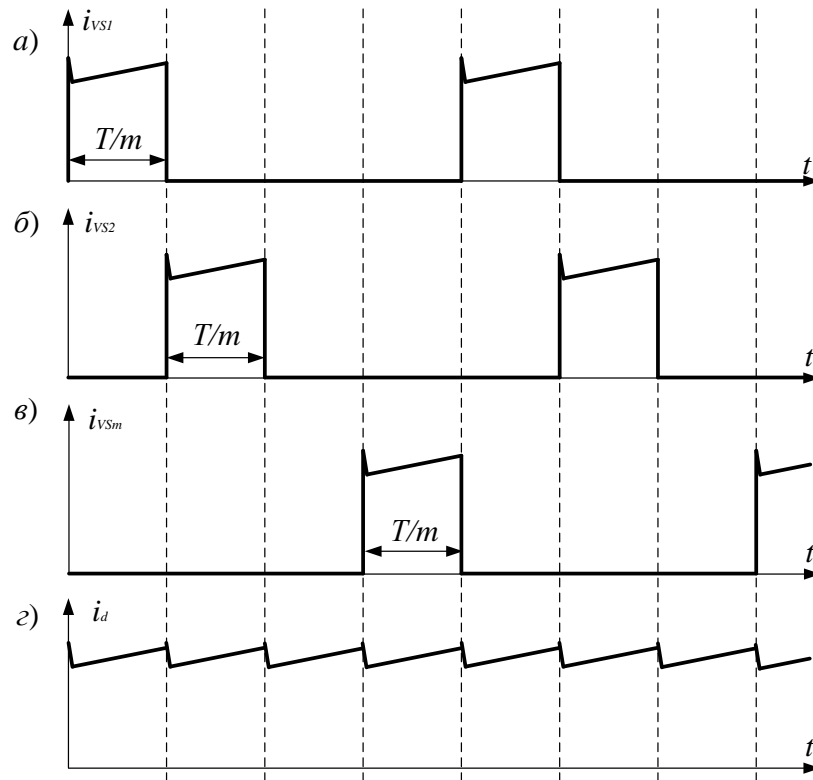


Рис. 2. Діаграми струмів понижувального ШПП

Оскільки кожна з фаз ШПП при такому керуванні працює почергово, створюється безперервний процес споживання струму від джерела енергії. В результаті струм i_d , який є сумою струмів керованих ключів фаз i_{VS} (рис. 1), має невеликий рівень пульсацій, бо вони спричинені лише комутаційними сплесками та струмами намагнічування фаз реактора (рис.2, а-г).

В сталому режимі струми намагнічування невеликі, що є наслідком використання багатофазного зрівняльного реактора $L2$ на загальному осерді, особливості застосування якого забезпечують високу еквівалентну індуктивність при відносно невеликих розмірах його конструкції [8]. Крім цього частота пульсацій зростає у m разів у порівнянні з частотою перемикання ключів, тому застосування легкого LC фільтра (на рис. 1 це $L1C2$) може забезпечити зниження пульсацій вхідного струму i_{ex} багатофазного ШПП до необхідного рівня. Щоправда, на вході перетворювача (рис. 1) необхідно встановити додатковий конденсатор фільтра $C1$, що потрібно для зниження рівня

комутаційних перенапруг при вимиканнях струму в лінії.

Перевагою багатофазної схеми є також те, що не потрібна велика ємність конденсатора вихідного фільтра $C3$, адже згідно рівняння (1) при вказаному алгоритмі роботи ШПП вихідна напруга не залежить від часу, а залежить від стабільності та рівня пульсацій вхідної напруги. Отже при досить якісній вхідній напрузі будемо мати мінімальні пульсації вихідної напруги, які спричинені лише комутаційними сплесками.

Що стосується напруги живлення та кількості фаз схеми понижувального ШПП, то для правильного вибору потрібно врахувати не тільки переваги передачі електричної енергії при підвищеній напрузі та більш високу якість електричної енергії живлення ЕРС, а й необхідні витрати на виготовлення, монтаж та експлуатацію перетворювача на базі високовольтних $IGCT$, а також установлених на сусідніх тягових підстанціях джерел постійного струму та лінії живлення ПП. До речі, коли достатньо лише одного ПП, то для зменшення витрат на спорудження та під'єднання до

контактної мережі він може бути суміщений із постом секціонування.

Якщо застосувати двофазний понижувальний перетворювач, який працює за алгоритмом почергового вмикання ключів різних фаз, то він повинен мати коефіцієнт заповнення імпульсів $\tau = 1/2$, тобто ШПП буде понижувати напругу вдвічі і для його живлення потрібна вхідна напруга 6,6 кВ. Сподівання на значну економію енергії при такому зростанні напруги в лінії електричної передачі не підтверджуються на практиці. У Росії розроблено ПП на базі понижувального ШПП 6,6/3,3 кВ, виконаного на *IGCT* за трифазною шестиканальною схемою [7], та згідно результатів порівняльних досліджень вигіднішою від нього є трансформаторно-випрямна структура ПП при живленні від мережі трифазного струму 10 кВ.

Розглянемо інші варіанти ПП на базі понижувальних ШПП з більш високою напругою живлення та більшою кількістю фаз. Слід врахувати, що при збільшенні напруги живлення потрібно буде зменшити коефіцієнт заповнення τ , а використання відносно вузької ширини імпульсів у ШПП призводить до збільшення втрат в процесі перетворення енергії. Відомо, що тривале використання для потужних понижувальних ШПП режиму роботи, при якому $\tau < 1/6$, є недоцільним і у такому випадку навіть краще переходити до трансформаторних схем [10]. Щодо збільшення кількості фаз в структурі перетворювача, то воно потрібне для збереження алгоритму почергового вмикання ключів різних фаз з безперервним споживанням струму із джерела. Зростання m потребує збільшення кількості ключів, але це не завжди слід розцінювати як ускладнення конструкції ШПП, адже для

потужних перетворювачів і без цього досить часто силові тиристори необхідно вмикати паралельно, щоб знизити струмове навантаження.

Отже, для створення ефективного ПП слід застосовувати понижувальний ШПП, у якого кількість фаз $m = 3-5$ і який буде працювати при одному із фіксованих значень коефіцієнта заповнення 1/3, 1/4 або 1/5. Оскільки ПП повинен забезпечувати напругу 3,3 кВ для подачі в тягову мережу, то при жорстко фіксованому співвідношенні між напругами на вході та виході ШПП напруга живлення його для різних варіантів (без урахування втрат в перетворювачі) повинна бути відповідно 9,9, 13,2 та 16,5 кВ. Така напруга може бути отримана від керованих випрямлячів розташованих на сусідніх тягових підстанціях, як запропоновано у роботі [9].

Виконаємо для порівняння розрахунок основних показників роботи ПП з понижувальними ШПП, які мають кількість фаз $m = 2-5$, тобто включаючи двофазний варіант. Лінію живлення виконуємо проводами 2А-185, якими буде подаватися енергія постійного струму від двох сусідніх тягових підстанцій до ПП. Також вважаємо, що ПП розташований посередині міжпідстанційної зони, довжина якої $l = 30$ км.

Щоб забезпечити можливість якісного живлення ЕРС, враховуючи потужність сучасних електровозів та швидкісних електропоїздів, приймемо номінальну потужність ПП рівною 8 МВт. Втрати напруги ΔU_l і потужності ΔP_l у лінії живлення розрахуємо за умови номінальної потужності навантаження ПП, тобто при номінальному вхідному струмі ШПП $I_{вх.ном}$

$$\Delta U_l = I_{вх.ном} R_l; \quad \Delta P_l = I_{вх.ном}^2 R_l, \quad (2)$$

де R_l – опір лінії живлення, який визначають через погонні опори проводу $r_{np} = 0,17$ Ом/км (для проводу А-185) та рейкової мережі $r_p = 0,015$ Ом/км (для двониткової колії з рейками Р65)

$$R_l = (r_{np}/k_{np} + r_p/k_k) l/2, \quad (3)$$

де k_{np} – кількість паралельних провідників лінії живлення;
 k_k – кількість паралельних рейкових колій.

$$R_{\text{л}} = (0,17/4 + 0,015/4) \cdot 30/2 = 0,694 \text{ Ом.}$$

Виконаємо оціночний розрахунок значення номінальної вхідної напруги $U_{\text{вх.ном}}$ та струму $I_{\text{вх.ном}}$ ШПП з урахуванням втрат у ключах та втрат у елементах фільтрів перетворювача за діючими струмом та

напругою. Розрахуємо також втрати напруги та потужності у лінії живлення ПП згідно рівнянь (2) і зведемо отримані результати у таблицю.

Таблиця 1. Основні показники роботи ПП з багатофазними ШПП

Кількість фаз, m	Вхідна напруга $U_{\text{вх.ном}}$, кВ	Вхідний струм $I_{\text{вх.ном}}$, А	Втрати напруги в лінії $\Delta U_{\text{л}}$, В	Втрати потужності в лінії $\Delta P_{\text{л}}$, кВт	Максимальна напруга випрямляча U_{dmax} , кВ	Потрібна кількість $IGCT$
2	6,64	1220	847	1033	8,4	8
3	9,95	815	566	461	11,0	9
4	13,25	612	425	260	14,1	16
5	16,56	490	340	167	17,2	25

Для оцінювання втрат потужності в лінії $\Delta P_{\text{л}}$ виконаємо розрахунок втрат у тяговій мережі $\Delta P_{\text{тм}}$ в середній частині міжпідстанційної зони при відсутності ПП. Щоб забезпечити згідно [1] хоча б мінімально необхідну напругу тягової мережі на

швидкісних ділянках $U_{\text{min}} = 2,9$ кВ в середній частині зони, потрібні вольтододавальні пристрої на підстанціях. При рухові швидкісного електропоїзда, який споживає із мережі енергію потужністю $P_e = 8$ МВт, його струм I_e буде:

$$I_e = P_e / U_{\text{min}}, \quad (4)$$

$$I_e = 8 \cdot 10^6 / 2900 = 2759 \text{ А.}$$

Для контактної підвіски, яка виконана за формулою М-120+2МФ-100, згідно рівняння (3) визначаємо опір тягової мережі $R_{\text{тм}} = 0,277$ Ом і за рівняннями (2) втрати напруги $\Delta U_{\text{тм}} = 764$ В та потужності $\Delta P_{\text{тм}} = 2108$ кВт. Застосування вольтододавальних пристроїв дозволило забезпечити необхідний рівень напруги в тяговій мережі при підвищенні вихідної напруги підстанції до 3664 В, але втрати $\Delta P_{\text{тм}}$ при цьому перевищують 25 % від корисної потужності. Це вдвічі перевищує втрати потужності в лінії $\Delta P_{\text{л}}$, які маємо навіть при використанні двофазного понижувального ШПП з найнижчою напругою живлення.

При номінальній потужності ШПП вихідна напруга керованих випрямлячів, яка потрібна в умовах двостороннього живлення ПП, з урахування втрат у перетворювачі та лінії буде відповідно складати 7,5, 10,5, 13,7 і 16,9 кВ. При односторонньому живленні ПП напруга працюючого випрямляча зростає до указаних у таблиці значень U_{dmax} .

Реалізувати такі джерела можна застосуванням керованих випрямлячів, підключених до вторинної обмотки понижувального трансформатора тягової підстанції номінальною напругою 10,5 кВ. Для п'ятифазного ШПП потрібен спеціальний понижувальний трансформатор та випрямляч з вихідною напругою 17,2 кВ, що ускладнює реалізацію такого варіанта. Найпростіше реалізувати джерело живлення ПП з чотирифазним ШПП, бо при застосуванні випрямляча на 14,1 кВ будуть мінімальні пульсації випрямленої напруги, що означає й мінімальні розміри фільтруючих пристроїв. Слід також уточнити, що для підтримання стабільності вихідної напруги ПП необхідно забезпечувати дистанційне регулювання вихідної напруги керованих випрямлячів на тягових підстанціях.

Кількість послідовно поєднаних силових $IGCT$ в схемі ШПП обрано із урахуванням їх максимально допустимої

напруги, яка дорівнює 6,5 кВ, з необхідним для тривалої експлуатації запасом за напругою. Для двофазного понижувального ШПП крім послідовного поєднання при вказаному струмовому навантаженні потрібне паралельне увімкнення силових *IGCT*, тому загальна кількість їх зростає до 8. При $m = 3-5$ паралельного поєднання тиристорів застосовувати не потрібно, бо *IGCT* виготовляють на струми до 800-1200 А. Найпотужніші тиристори, тобто розраховані на найбільші струми, будуть необхідні для трифазного ШПП, що суттєво підвищить вартість перетворювача.

З отриманих результатів можемо зробити висновок, що двофазний ШПП, дійсно має досить великі втрати потужності в лінії живлення ПП, тому його застосування найменш вигідне. Наступні два варіанти при знижених втратах потужності є дещо складнішими двофазного, але простішими і дешевшими у порівнянні з п'ятифазним

ШПП, де потрібно 25 *IGCT*. Із трифазного та чотирифазного варіантів перевагу має чотирифазний ШПП за рахунок менших втрат енергії в лінії живлення та простішої будови джерел живлення.

Деяку складність викликає реалізація чотирифазного зрівняльного реактора на чотиристержневому осерді, індуктивність та взаємодуктивність обмоток якого були б ідентичними у всіх фазах. Розглядалися варіанти такого реактора з плоскою та просторовою магнітною системами. Простіша плоска конструкція для забезпечення ідентичних у всіх фазах параметрів потребує використання двох реакторів, обмотки яких поєднані за схемою рис. 3, а. При моделюванні чотирифазний реактор було реалізовано застосуванням схеми поєднання чотирьох трифазних індуктивних елементів рис. 3, б, що може бути використано при розробці конструкції чотирифазного ШПП.

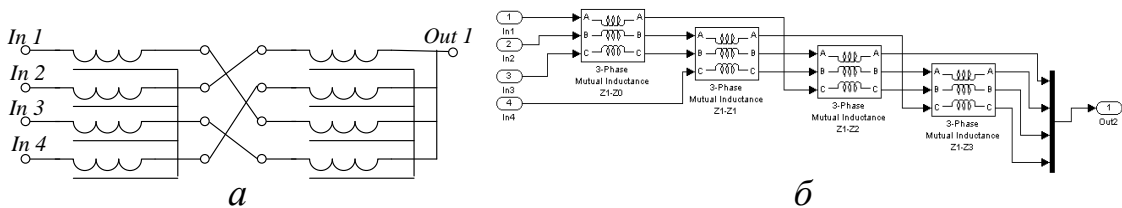


Рис.3. Схеми реалізації чотирифазного зрівняльного реактора

Висновки. Для підвищення ефективності роботи системи тягового електропостачання постійного струму при великих навантаженнях тягової мережі і

довжині міжпідстанційної зони понад 25 км слід застосовувати перетворювальні пункти на основі чотирифазних понижувальних ШПП.

Список використаних джерел

1. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України [Текст] № ЦЕ-0009. - К.: ТОВ „Швидкий рух”, 2005. - 80с.
2. Kotelnikov, A. World trends in the development of railway electrification [Text] / A. Kotelnikov, A. Glonti // Rail International. - 2001. - August/September. P.26 – 35.
3. Майер, Л. Оценка возможностей электротяги на 12 кВ постоянного тока [Текст] / Л. Майер, О. Вентура. - Ingenering Informazia. 1989. С. 271 – 273.
4. Carpita, M. Preliminary design of a 18 kv locomotive / M. Carpita, P. Cesario, P. Farina, O. Ventura. Sevilla. EPE95, 1995.
5. Марикин, А.Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07 / А.Н. Марикин; [Петербургский госуниверситет путей сообщения]. – СПб., 2008. – 36 с.
6. Корниенко, В.В., Электрификация железных дорог [Текст] / В.В. Корниенко, А.В. Котельников, В.Т. Доманский. // Мировые тенденции и перспективы (Аналитический обзор): Монография. – К.: Транспорт Украины, 2004. – 196 с.
7. Федотов, А.А. Электроснабжение контактной сети постоянного тока с питанием повышенным напряжением преобразователя по усиливающему проводу [Текст] / А.А.

Федотов, Н.П. Анхимов, С.Н. Васильев и др. // Труды Межд. симп. «Элтранс». – СПб., 2003 – С. 291-296.

8. Гончаров, Ю.П. Система электроснабжения контактной сети постоянного тока с продольной линией повышенного напряжения [Текст] / Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, В.Н. Козачок, В.В. Замаруев, В.В. Ивахно, С.Ю. Кривошеев, А.И. Семененко // Вісник ДНУЗТ. – 2008. – С. 42-48.

9. Семененко, О.І. Трифазний ШП для пункту підвищення напруги 10/3,3 кВ [Текст] / О.І. Семененко, Т.В. Ісакова, Є.А. Аветісов // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, № 126. – Х. – 2011 р. – С. 204-208.

10. Гончаров, Ю.П. Обратимый преобразователь для связи двух линий постоянного тока в системе распределенного тягового электроснабжения [Текст] / Ю.П. Гончаров, Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко и др./ Технічна електродинаміка, темат. вип. „Проблеми сучасної електротехніки”. – К. – 2004. – ч. 6, С. 99-106.

Семененко Олександр Іванович, к-т техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua

Семененко Юрій Олександрович, аспірант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту, Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua

Semenenko Oleksandr Ivanovych, Ph.D., associate professor Department automated electric vehicle, Ukrainian State University of Railway Transport.

Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua

Semenenko Yuriy Oleksandrovych, Postgraduate Department automated electric vehicle, Ukrainian State University of Railway Transport.

Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua

Стаття поступила 25.04.2015

УДК 621.313.33

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДА

С.Г. БУРЯКОВСКИЙ, к.т.н., доцент

ВИКОРИСТАННЯ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ СТРЕЛОЧНОГО ПЕРЕВОДУ

С.Г Буряковський, к.т.н., доцент

USE MODAL CONTROLLER BY THE ELECTRIC MOTOR OF POINTER TRANSLATION

S. Buryakovskiy

Целью работы является обоснование возможности использования модального регулятора для управления двигателем в стрелочном переводе, а также рассмотрение методики его расчета. Предложенная система улучшает качество переходного процесса и упрощает обслуживание перевода, поскольку уменьшаются динамические нагрузки в кинематической линии

Ключевые слова: стрелочный перевод, модальный регулятор, электродвигатель, переходной процесс.

Метою роботи є дослідження можливості використання модального регулятора зі спостерігачем стану в системі керування стрілочного переводу, а також розгляд методики розрахунку коефіцієнтів регулятора. Таке рішення покращує керованість та обслуговування переводу.

Ключові слова: стрілочний перевід, модальний регулятор, електродвигун, перехідний процес.

The aim is to study the possibility of using modal controller for controlling the motor in turnouts, as well as consideration of the method of its calculation. The proposed system improves the quality of the transition process and simplifies maintenance of translation, because it reduces the dynamic loads in the drive line. The proposed settlement allows you to get the required parameters of the actuator control, optimize service process engine for different types of switches and operating conditions. This approach - this is a step in the development of the theory of actuators railway automation. The use of modal controller with observer status instead of the traditional system of subordinate regulation provides greater speed and accuracy, as well as improves the dynamic characteristics of the control object. Implementation of systems with modal controller and observer status significantly improves the reliability of the control system of asynchronous electric rolling TED and saving energy for traction. Management system must be implemented in the form of integrated circuits with microcontroller control.

Keywords: turnouts modal controller, motor, transient.

Введение. Находящиеся в эксплуатации стрелочные переводы, используют двигатели переменного и постоянного тока. Последние весьма распространены, однако обладают как рядом неоспоримых достоинств, так и серьезных недостатков. Поскольку стрелочные переводы являются одним из важнейших исполнительных элементов железнодорожной автоматики, требуется переход с морально устаревших релейно-контакторных на транзисторные системы с микропроцессорным управлением.

Постановка проблемы в общем виде и её связь с важными научными и практическими задачами

Усовершенствование существующих стрелочных приводов путем замены ненадежных или морально устаревших элементов новыми должно обеспечить повышение пропускной способности станций и повысить безопасность движения.

Стремительное развитие полупроводниковой техники как в силовом, так и микропроцессорном сегменте привело к её широкому распространению и резкому удешевлению одновременно со значительным повышением надежности. Повышение частоты работы процессоров приблизило качество управления дискретных систем к непрерывным одновременно повысив точность. Весогабаритные, экономические, технические и эксплуатационные показатели

новых систем значительно превосходят аналоги предыдущих поколений.

Таким образом, предлагаемый путь модернизации существующих систем управления стрелочных переводов является актуальным с точки зрения необходимости перехода к новой, современной, элементной базе систем автоматики.

Анализ последних достижений и публикаций.

Одним из основных путей повышения безопасности движения является создание систем стрелочных переводов, позволяющих не только сократить время перевода остряков, но сделать этот процесс безударным и детерминированным. Еще одним важным аспектом повышения безопасности движения является создание систем инвариантных к изменениям окружающей среды. Простым путем решения этой задачи, при условиях использования прежних электромеханических систем, есть внедрение тиристорных, а лучше транзисторных преобразователей, управляющих напряжением на клеммах электродвигателя по заданному закону.

В настоящее время в мире получили широкое распространение системы преобразователь-двигатель с системой подчиненного регулирования в качестве управляющего и контролирующего органа. Система подчиненного регулирования представляет собой многоконтурную структуру с последовательной коррекцией

координат от внешних к внутренним. В случае со стрелочным переводом такими координатами являются – контур регулирования положения (внешний), далее – контур регулирования скорости двигателя, контур регулирования тока двигателя и контур регулирования ЭДС преобразователя (внутренний). В данном случае координата ЭДС преобразователя является величиной питающего напряжения на клеммах электродвигателя, которая и будет являться основной управляемой переменной.

В последние годы интенсивно развиваются системы управления, основанные на методах параллельной коррекции, которые получили название систем модального управления [1]. Они представляют собой одноконтурные системы с обратной связью по вектору состояния. При этом их быстродействие задается величиной среднегеометрического корня, который лежит в основе синтеза коэффициентов обратной связи путем приравнивания характеристического полинома проектированной системы стандартному нормированному распределению.

Применение методов модального управления относится к случаю синтеза системы по управляющему сигналу. Предполагается, что управляющий сигнал, или не влияет на алгоритм работы системы управления, или отклонение координат системы при воздействии возмущающих факторов незначительно.

Передаточные функции замкнутых систем по управляющему сигналу предусматривают, что у них в числителе вместо постоянного коэффициента получается полином, который характеризуется несколькими нулями. Поэтому разные варианты распределения корней характеристического уравнения, обеспечивают синтез систем с заданными показателями качества по управлению, но не позволяют синтезировать системы по возмущающему воздействию.

Электроприводы с системой модального управления являются статическими к возмущающему воздействию, то есть имеют статическую

ошибку. Однако, в электроприводах стрелочных переводов, влияние нагрузки определяется в основном реактивным моментом, связанным с силой трения, поэтому в такой системе допустимо не учитывать влияние возмущений.

Одним из основных недостатков системы модального управления есть необходимость в информации о полном векторе состояния управляемых координат. В случае невозможности получения этой информации применяют идентификаторы состояния или, так называемые, наблюдатели состояния [2]. Наблюдатели состояния полного порядка представляют собой линейную систему того же порядка, что и электропривод с системой управления. Для увеличения быстродействия и точности работы привода этими методами необходимая расширенная информация о поведении координат системы регулирования и действующие на нее возмущения.

Определение цели и задачи исследования.

Устранить противоречие между точностью работы системы и её быстродействием помогает современная теория и техника управления. В частности, использование метода пространства состояний, фундаментальных понятий управляемость и наблюдаемость, управление по вектору состояния и применение наблюдателей состояния. Последние открывают возможность решения задач идентификации ненаблюдаемых координат объекта, идентификации основного возмущения, которое действует на электропривод с влиянием силы трения в механизме, а также, что есть важно, содействуют приданию системе новых динамических свойств [3].

Основная часть исследования.

Для синтеза модального регулятора с наблюдателем состояния электропривода стрелочного перевода используется программное обеспечение: Matlab 6.5 [4]. На рисунке 1 приведенная математическая модель синтезированной системы. За основу был взят стрелочный перевод типа СП-6 с двигателем постоянного тока МСП-0,25 [5].

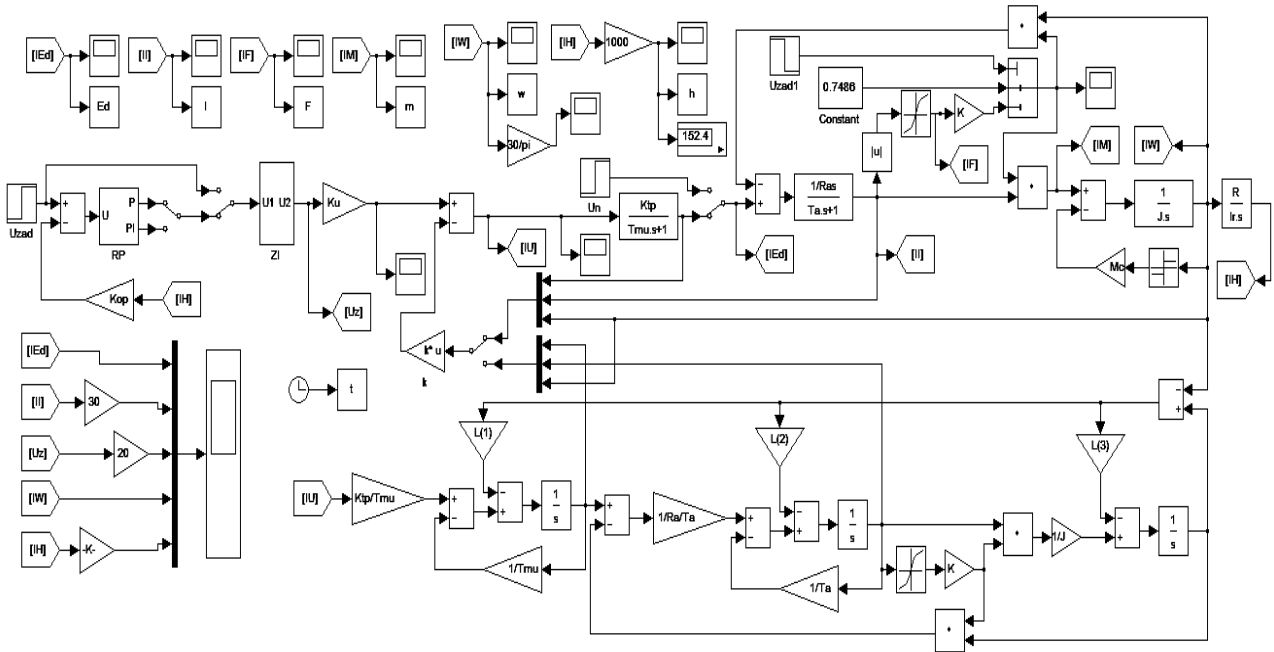


Рис. 1. Общий вид матмодели электропривода стрелочного перевода с модальным регулятором и наблюдателем состояния

Расчеты параметров модели:

Избираем вектор состояния $X = \begin{vmatrix} E_d \\ I_{я} \\ \omega \end{vmatrix}$, и вектор управления $U = |U_3|$.

Из модели находим уравнения для составления системы дифференциальных уравнений:

$$1. \frac{dE_d}{dt} = \frac{K_{II}}{T_{\mu}} \cdot U_3 - \frac{1}{T_{\mu}} E_d. \quad (1)$$

$$2. \frac{dI_{я}}{dt} = \frac{E_d}{R_{я}T_{я}} - \frac{I_{я}}{T_{я}} - \frac{k\Phi}{R_{я}T_{я}} \omega. \quad (2)$$

$$3. \frac{d\omega}{dt} = \frac{k\Phi}{R_{я}T_{M}} I_{я}. \quad (3)$$

Составляем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dE_d}{dt} = -\frac{1}{T_{\mu}} E_d + 0I_{я} + 0\omega + \frac{K_{II}}{T_{\mu}} U_3 \\ \frac{dI_{я}}{dt} = \frac{1}{R_{я}T_{я}} E_d - \frac{1}{T_{я}} I_{я} - \frac{k\Phi}{R_{я}T_{я}} \omega + 0U_3 \\ \frac{d\omega}{dt} = 0E_d + \frac{k\Phi}{R_{я}T_{M}} I_{я} + 0\omega + 0U_3 \end{cases} + \begin{vmatrix} \frac{K_{II}}{T_{\mu}} U_3 \\ 0U_3 \\ 0U_3 \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Векторно-матричная система уравнения:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases}, \quad (5)$$

где A – матрица состояний;
 B – матрица управления;
 C – матрица выхода;
 D – матрица безинерционных связей;

$$A = \begin{vmatrix} -\frac{1}{T_\mu} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_\alpha T_\alpha} & -\frac{1}{T_\alpha} & -\frac{k\Phi}{R_\alpha T_\alpha} \\ 0 & \frac{k\Phi}{R_\alpha T_m} & 0 \end{vmatrix} \text{ и } B = \begin{vmatrix} \frac{K_\Pi}{T_\mu} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$C = |0 \ 0 \ 1| \quad D = |0| \quad (7)$$

Передаточная функция модального регулятора имеет вид фильтра Баттерворта:

$$W(p) = \frac{1}{1p^3 + 2p^2 + 2p + 1} \quad (8)$$

Корнем уравнения для модального регулятора будет $\Omega_{0mp}=100$ рад/с, а для наблюдателя состояния $\Omega_{0nc}=3 \cdot \Omega_{0mp} = 300$ рад/с.

При разработке модели сначала вводим исходные данные для разработки математической модели электропривода

стрелочного перевода с модальным регулятором и наблюдателем состояния. Ниже приведен блок ввода исходных данных, а так же расчеты матриц, которые используются при определении коэффициента усиления модального регулятора (K_u) и коэффициентов наблюдателя состояния (L_1, L_2, L_3):

```

%Расчет параметров ДПТ ПВ
|
%матрицы состояния
A=[-1./Tmu 0 0;1./Ras./Ta -1./Ta -KFn./Ras./Ta; 0 KFn./J 0];
B=[Ktr./Tmu;0;0];
C=[0 0 1];
D=[0];

%Модальный регулятор
W0=100;
[z1,p1,k1]=buttap(3);
[n,d]=zp2tf(z1,p1,k1);
d=d.*[W0.^0 W0.^1 W0.^2 W0.^3];
k=place(A,B,roots(d));
Ku=3.8;

%Наблюдатель состояния
W0=300;
[z1,p1,k1]=buttap(3);
[n,d]=zp2tf(z1,p1,k1);
d=d.*[W0.^0 W0.^1 W0.^2 W0.^3];
%Коэффициенты коррекции
L=place(A',C',roots(d));
    
```

Расчеты осуществляется с помощью функции Plase.

Результаты расчетов приведены на рисунке 2, где можно видеть следующие координаты: 1 – напряжение задания (U_z); 2 – ЭДС преобразователя (E_d); 3 – ток якоря

электродвигателя (I_a); 4 – угловая скорость вращения якоря двигателя (ω_d); 5 – линейное перемещение острьяков стрелочного перевода (S).

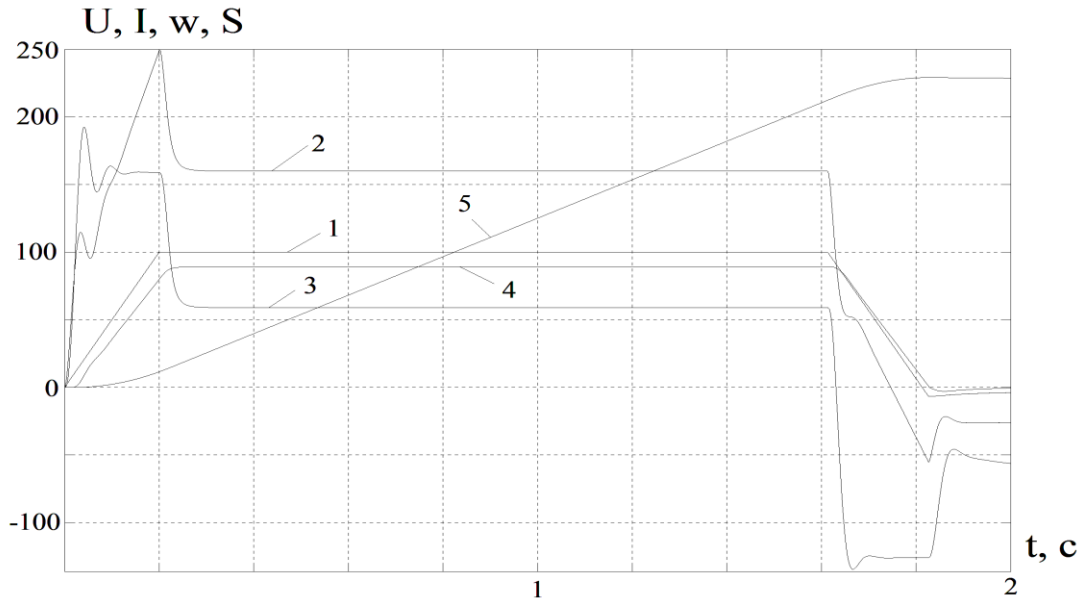


Рис. 2. Результаты расчета основных координат на матмодели

Выводы и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении.

Применение модального регулятора системы управления электроприводом стрелочного перевода в сочетании с полупроводниковым преобразователем напряжения позволяет обеспечить высокое качество перевода острьяков в сочетании с повышением надежности и быстродействия. Эти результаты достигаются регулированием величины силы тока, а следовательно и момента на валу электродвигателя. Ограничение силы тока при регулируемом пуске обеспечивает более длительный срок эксплуатации щеток и коллектора машины, а так же делает систему инвариантной к возмущающим воздействиям в виде переменного коэффициента трения в

контакте «рельс-остряк». Управление моментом позволяет избежать ударных нагрузок в кинематической линии стрелочного перевода. Использование системы управления с контуром положения позволяет произвести безударное примыкание острьяка к рамному рельсу, что создает благоприятные условия эксплуатации, а именно – уменьшает силу удара острьяков, которая «разбивает» штатный размер 1520 мм между рельсами и приводит к возникновению и увеличению зазоров в соединительной тяге и шибере.

Полученные результаты служат основанием для создания современной системы управления электроприводом стрелочного перевода с последующей пробной эксплуатацией и оценкой эффективности её работы.

Список літератури

1. Коцегуб П. Х., Толочко О. И., Губарь Ю. В. Анализ и синтез комбинированной цифроаналоговой системы регулирования скорости. – Известия вузов. Электромеханика, 1984, №2, с. 45 – 51.
2. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. - М.: Машиностроение, 1976.- 184 с.

3. Толочко О. И., Тищенко А. А. Система модального управления приводом постоянного тока с узлом токоограничения. - Сб. науч. трудов ДонГТУ. Серия "Электротехника и энергетика", вып. 4. - Донецк: ДонГТУ, 1999, с. 42- 45.

4. С.Г.Герман-Галкин. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. - СПб.: КОРОНА принт, 2007, 320с.

5. Резников Ю.М. Стрелочные электроприводы электрической и горочной централизации. М.: «Транспорт», 1975

Буряковський Сергій Геннадійович , Канд. техн. наук, доцент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Конт. тел.: (057) 730-10-74., E-mail:sergbyr@i.ua

Buriakovskiy Sergii , PhD., assistant professor of the Department "Automated systems of electric transport" Ukrainian State Academy of Railway Transport, (057) 730-10-74., e-mail: sergbyr@i.ua

Стаття поступила 21.04.2015

УДК 65.011.56:007.52

SECURITY ROBOTIC INDUSTRIAL PROCESSES

Aldona Kuśmińska-Fijałkowska, PhD, A. Mastepan

БЕЗПЕКА РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

Алдона Кузмінська-Фіалковська, доктор філософії, А.Г. Мастепан

БЕЗОПАСНОСТЬ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Алдона Кузминская-Фиалковская, доктор философии, А.Г. Мастепан

В даний час спостерігається тенденція зростання числа автоматизованих і роботизованих виробничих процесів на машинобудівних підприємствах та підприємствах обслуговування та ремонту залізничної техніки. Відповідно до даної тенденцією виникає потреба в розробці та аналізі вимог безпеки, що пред'являються до машини. У роботі проаналізовано найважливіші етапи життєвого циклу роботів і ризику, що виникають за цей час, це необхідно для подальшої розробки стандартів пов'язаних з безпечною роботою машин на виробництві.

Ключові слова: безпека, робот, машина.

В данное время наблюдается тенденция роста числа автоматизированных и роботизированных производственных процессов на машиностроительных предприятиях и предприятиях обслуживания и ремонта железнодорожной техники. В соответствии с данной тенденцией возникает потребность в разработке и анализе требований безопасности, предъявляемых к машине. В работе проанализированы важнейшие этапы жизненного цикла роботов и риски, возникающие за это время, это необходимо для дальнейшей разработки стандартов связанных с безопасной работой машин на производстве.

Ключевые слова: безопасность, робот, машина.

Now there is a tendency of increasing the number of automated and robotic manufacturing processes at the machine-building enterprises and the enterprises of maintenance and repair of railway equipment.

In accordance with this tendency there is a need in development and analysis of safety requirements to the machine. This work analyzes the most important stages of the life cycle of the robots and the risks that occurring during this period, it is necessary for the further development of standards related to the safe operation of machinery at work.

In the European Union producers, distributors and users of all industrial facilities must follow the instructions of the Machinery Directive. The Directive recognizes exactly that machines can not be a source of danger for those working in the industry. Unfortunately, there is no technology without risks, because the aim should be to achieve an acceptable risk

Keywords: *safety, robot, machine.*

Introduction.

In automated production processes, there are risks that can lead to damage to property or cause an accident. [7,10] GUS distinguishes the following types of threats:

- The risk factors associated with the work environment: among them were the most harmful chemicals, industrial dusts and noise;
- Risks associated with strenuous work, for example. Forced posture, heavy exercise, insufficient illumination jobs, etc.;
- The harmful effects of mechanical factors associated with particularly dangerous machinery (such as circular saws and belt, milling machines, presses and other).

Industrial robots are a means to eliminate such hazards. [5, 6] The primary function of robots to replace humans in the work difficult and dangerous.[8, 12] Another important factor in dissemination of robotics and more important as time goes on the cost-effectiveness of this process automation, resulting from the improvement, product quality and better use of the means of production.[9] Unfortunately, industrial robot may also cause danger. Therefore it is necessary to use appropriate preventive measures.[13]

Safety of machinery in the production process.

Safety in robotic manufacturing processes is a concept involving the protection of human life and health, as well as production machines, transport, energy and others. It also has all the problems related to the continuity of production. [11] The most unreliable part of the production process is the man operator or technician who work. The foundation of safe operation of the robot are primarily regularly reviewed and

neglects their duties, which neglects the duties. Therefore, every human contact with the robot should be considered as a potential source of danger. The consequences of accidents are a threat to health or life of employees as well as material losses incurred by the company. Therefore, the responsibility for the safety of in the workplace lies not only users of industrial robots, but also designers, manufacturers and suppliers of machinery. Ensure the safety of the process line forcing provisions of the European Union and the Polish standards. Machinery Directive standards are constantly updated, so you should keep track of the changes. [2]

The legal standard governing the safety of machinery applies to all devices involved in the production process. The European Union has introduced two pillars of safety for new machines (for the first time entering the European Union) and equipment already in use.

The design of the new devices should provide security at a certain high level. Machines used should be adjusted and maintained at a minimal level, which would ensure safety (Fig. 1).

Secure the robot.

Guidance on the safe operation of the robot can be found in the harmonized standard EN ISO 10218-1 and ISO 10218-2. These standards describe the basic threats and situations jeopardizing the safety of robotic industrial applications. Also specified requirements to eliminate or reduce the risks associated with those hazards. Current regulations of 2011 also include the security of the entire system with its proper maintenance. Working production machine performs ultra fast movements, which

is why it is important to secure an area in its range. For this purpose, the most commonly used security fence and other collateral, such as light curtains, safety locks sensor, pressure

mats, warning lights, buttons, safety, mechanical stops, which will write in later chapters.

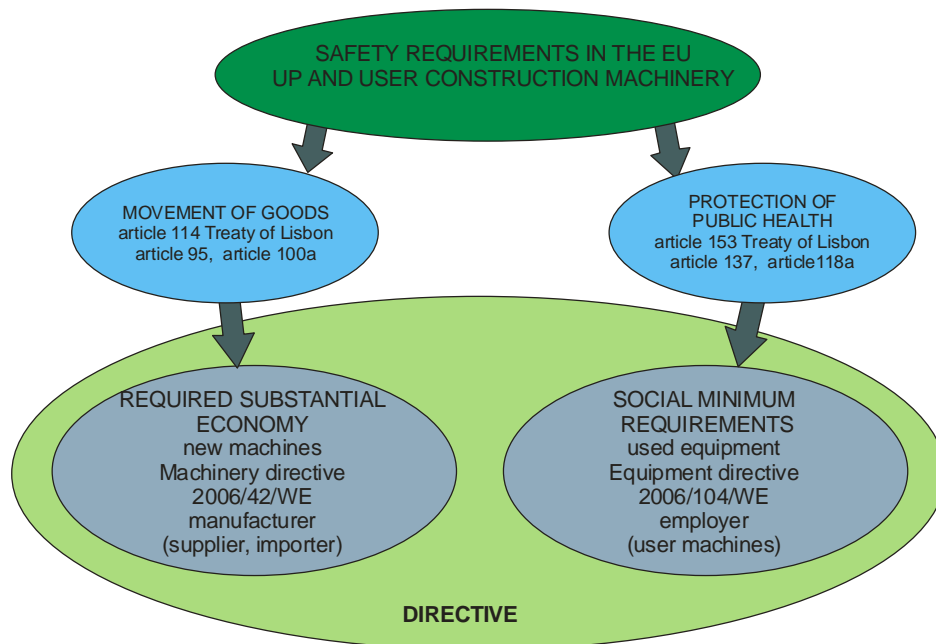


Fig. 1. EU regulations relating to new and used robots

<250 mm / s. [3]

In order to avoid an accident while working with the robot, it is essential to follow certain rules:

- operators of industrial robots and robotized whole can only be persons who have received appropriate training;
- forbidden to reside within the area of the robot during automatic operation and during testing at high speeds;
- prohibits the bridge safety sensors and security systems (bypassing security systems, in which the machine is provided);
- in the case of imminent danger to health or life should immediately use a safety button (red mushroom);
- prohibits the robot attempts to stop his own body (in order to quickly stop the robot use the buttons safety);
- prohibits the closing of others in the field of the robot;
- Before entering the robot work area must stop execution of the program, robot switch to manual mode with a speed limit

Design of robotic industrial process.

The basic principles of designing a safe position robotic and other equipment used in processing determines the standard BS EN ISO 12100. It defines the key terms are set out the next steps and principles of assessment and risk reduction. The standard is to facilitate the designers to ensure the safety of equipment at the design stage. The next steps of the risk assessment should be:

- identify the limits of the machine including the life of the machine as intended and foreseeable use of the wrong;
- identification of hazards and situations associated with them;
- risk assessment for each hazardous situation;
- decide if you need to reduce risk.

The risk assessment is based on a systematic gathering of information and analysis of the potential hazard to the line. After the risk assessment, if necessary, use protective measures - reducing the risk. Protective

measures are solutions used by the designer and the user. Their goal is to increase security. It is recommended to use the solutions proposed by the designer, since the protective measures selected by the user are usually less effective (Fig.).

The first protective measures, which should offer designer design solutions, are secure in themselves. Risk reduction through the use of these measures is to take the geometric factors and physical aspects of machine:

- machine components should be designed in such a way as to allow observation of the working areas and danger zones;

- avoid the use of any sharp edges and protruding;
- maximize the distance of the moving parts of the machine operator, so that it was possible to maintain a safe distance;
- allow the operator easy access to control elements;
- limiting the force needed to run;
- reducing the weight or speed of moving parts;
- reduction of emissions (noise, vibration).

[4]

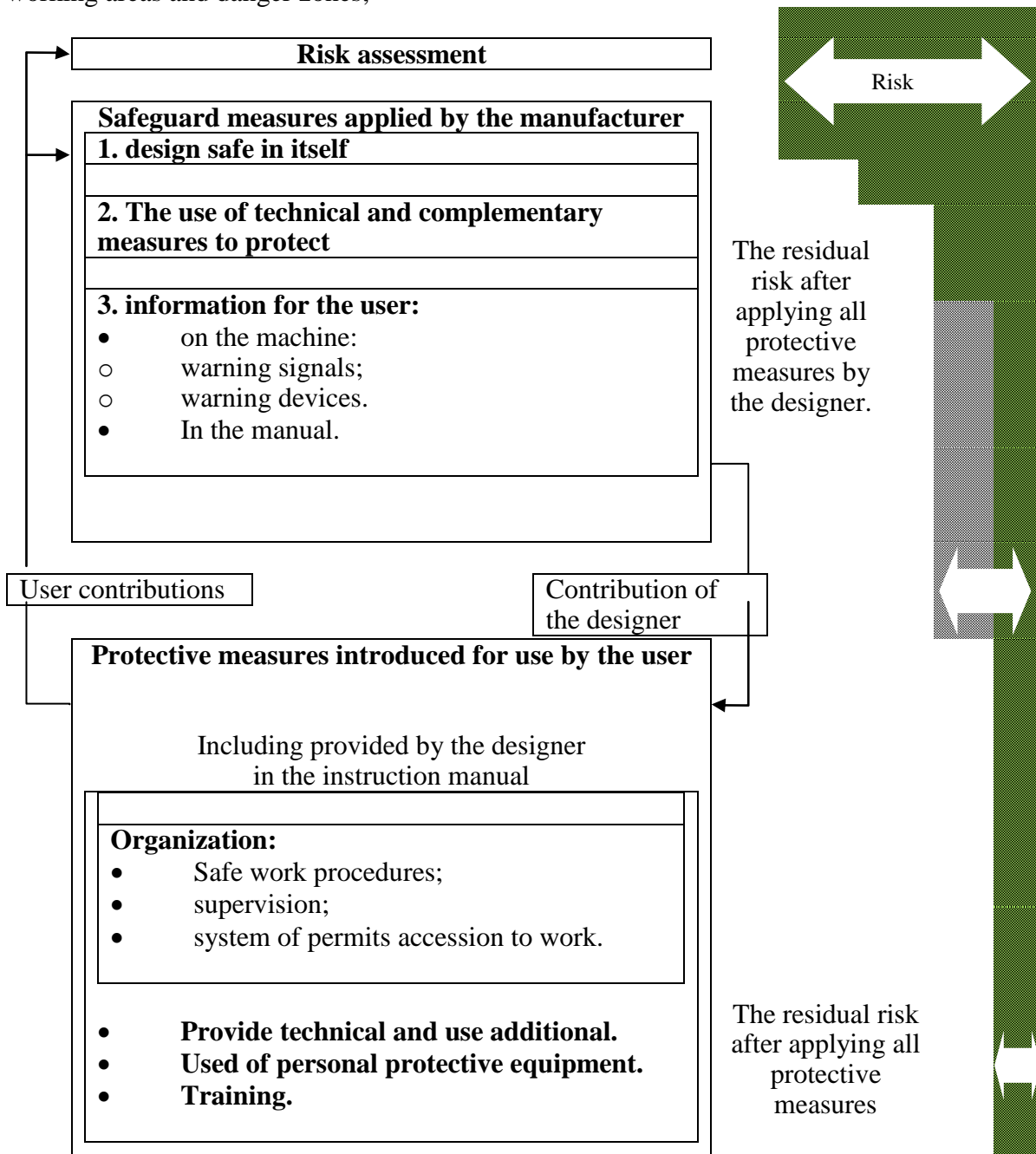


Fig. 2. Reducing the risk of a design standpoint [4]

If the design solutions in themselves do not reduce the threat to the required level, use technical conservation measures (guards, electro-sensitive device) and additional protective measures (emergency stop equipment). Designers should be aware that it is necessary to provide the user with information about the device correct operation. Such documentation should include information on the hazards of the machine and to define the measures which should be taken to eliminate them. Depending on the emergency, you must decide what warnings are sufficient (the information in the documentation, warning signs). If using these signals and warning devices must be unambiguous and issued prior to the incident. [4]

Analysis of the risks of robotic industrial process.

At the moment of conception of a new industrial robot in the first place should refer to

the archived data. If in the past created a similar device it is possible to know the problems they grappled the user. Unfortunately, you can not always learn from others' mistakes and experiences. Therefore, you should analyze the risks and dangers of the project.

Elimination of hazards at the design stage of an industrial installation is important at every stage of the life of the device. General issues relating to the safety of the production plant is called process safety. [2]

Process safety department relating to the controlled equipment (EUC - equipment under control) and the control system is functional safety. It is a branch of engineering which includes issues of risk prevention by designing precise functions operating in hazardous conditions. Each phase of life industrial applications require the use of appropriate methods of analysis (Fig. 3.)

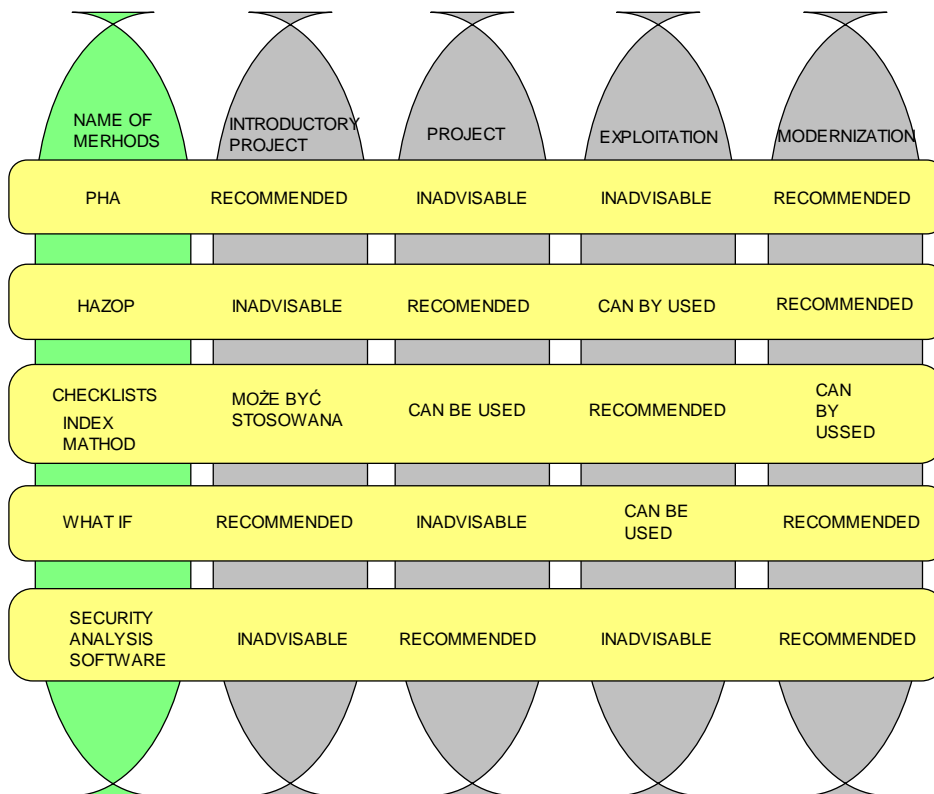


Fig. 3 The use of safety analysis methods

In engineering practice, are used in the methods summarized below [2]:

- comparative method (applied knowledge of similar installations):

○index method (e.g. DOW Index, OPS Index);
○of checklists

●inspection method (systematic review of threats):

○PHA (Preliminary Hazard Analysis);
○HAZOP (Hazard and Operability Study);

○„What – If”

●analytical methods (detection and quantitative assessment of the risks of accident scenarios):

○FMEA (Fault Mode and Effect Analysis);

○FTA (Fault Tree Analysis);

○ETA (Event Tree Analysis);

○CCA (Cause Consequence Analysis).

Conclusions.

The creation of a growing number of industrial robots and their continuous development pose problems of cooperation

between man and machine. Threat to the machine operators is the increasing rate of production equipment. Technological advances mean that a person becomes less suitable to work in the factory. Industrial robots are able to perform complex tasks in a short period of time, as this is more reliable. Unfortunately, the current technology is not able to replace humans in every position on the line. Even so advanced devices such as industrial robots require the presence of the operator. The increasing number of automated processes and care about the safety of the workers were impetus to the requirements to be met by the machine. In the European Union producers, distributors and users of all industrial facilities must follow the instructions of the Machinery Directive. The Directive recognizes exactly that machines can not be a source of danger for those working in the industry. Unfortunately, there is no technology without risks, because the aim should be to achieve an acceptable risk

Bibliography

1. Łabanowski, W. Safety in use of machinery [Text] / W. Łabanowski. – Warsaw, 2012.
2. Human Safety of machinery processes the monthly allowance 2011. Engineering and maintenance. – Warsaw: Trade Media, 2011.
3. PN-EN ISO 10218: 2011. Construction and equipment for robotics - Safety requirements for industrial robots.
4. PN-EN ISO 12100: 2012. General principles for design - Risk assessment and risk reduction.
5. Kuśmińska-Fijałkowska, A. Programming trajectory industrial robot palletizing process [Text] / A. Kuśmińska-Fijałkowska, Z. Łukasik. – Journal of Logistics 3/2014. – pp. 3577-3582, ISSN 1231-5478.
6. Łukasik, Z. Critical Infrastructure Security Management [Text] / Z. Łukasik, W. Nowakowski, A. Kuśmińska-Fijałkowska. – Journal of Logistics 4/2014. – CD1, pp. 758-763, ISSN 1231-5478.
7. Kozyra, J. Linear elements used in securing logistics facilities explosive [Text] / J. Kozyra, A. Kuśmińska-Fijałkowska. – Journal of Logistics 4/2014. – CD1, pp. 572-580, ISSN 1231-5478.
8. Kuśmińska-Fijałkowska A., Łukasik Z.: "" Robotic laboratory system based on robot Fanuc S-420F ". 14 International Conference "TransComp", Zakopane 6-9. ISBN 978-83-7204-956-8, 12. 2010, Logistics 6/2010
9. Kuśmińska-Fijałkowska, A. Programming KAREL industrial robot Fanuc S-420F. Structuring the program - Procedures [Text] / A. Kuśmińska-Fijałkowska, Z. Łukasik. – Journal of Railway Transport Technology 9/2012. – ISSN 1232-3829.
10. Krajewska, R. The design of storage systems [Text] / R. Krajewska, Z.Łukasik. – Journal of Logistics 6/2009.
11. Krajewska, R. Managing logistics projects in the power plant [Text] / R. Krajewska, Z. Łukasik. – Journal of Logistics 3/2014. – pp. 3236-3246, ISSN 1231-5478.

12. Krzyszkowski, A. Logistics and Security asymmetric [Text] / A. Krzyszkowski, Journal of Logistics 3/2014.

13. Bril, J. Transport safety [Text] / J. Bril, Z. Łukasik. – Journal of Buses, Engineering, Operation, Transport Systems 3/2013. – pp. 1895-1905, ISSN 1509-5878.

Aldona Kuśmińska-Fijałkowska, PhD, University of Technology and Humanities, Faculty of Transport and Electrical Engineering, Poland

Anton Mastepan, assistant, Department of automated systems of electric transport, Ukrainian State Academy of Railway Transport, Contact tel.: (057) 730-10-76, E-mail: antonua86@bk.ru

Алдона Кузмінська-Фіалковська, доктор філософії, Університет технологій та гуманітарних наук, Факультет транспорту та електротехніка, Польща

Мастепан Антон Геннадійович, Асистент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Українська державна академія залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-76, E-mail: antonua86@bk.ru

Стаття поступила 20.05.2015

УДК 621.311

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ УСТАНОВОК ГАРАНТОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ БЛОЧНО МОДУЛЬНИХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

**Кандидат технічних наук, доцент Супрун О.Д.
магістр Коваленко О.В**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ БЛОЧНО МОДУЛЬНЫХ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

**Кандидат технических наук, доцент Супрун О.Д.
магистр Коваленко О.В.**

RESEARCH FACILITIES TRANSIENT OPERATING CONDITIONS OF GUARANTEED POWER SUPPLY BLOCK MODULAR TRACTION SUBSTATION

**Candidate of Technical Sciences, associate professor Suprun O. D.
master, Kovalenko O. V.**

В статті запропонована математична модель, що встановлює зв'язок між параметрами та можливими збуреннями електротягової системи. Розроблена методика розрахунку кидків струму та провалів напруги в режимах коротких замикань та зникнення напруги мережного введення. Запропоновані рекомендації щодо підтримки необхідної якості напруги.

Ключові слова: *установки гарантованого живлення, шини гарантованого живлення, електро тягова мережа, система електропостачання.*

В статье предложена математическая модель, которая устанавливает связь между параметрами и возможными возмущениями электротяговой системы. Разработана методика расчета бросков тока и провалов напряжения в режимах коротких замыканий и исчезновения напряжения сетевого ввода. Предложены рекомендации относительно поддержки требуемого качества напряжения.

Ключевые слова: установки гарантированного питания, шины гарантированного питания, электротяговая сеть, система электроснабжения.

In this study, the analysis of the known systems of guaranteed power supply, the results of which selected diesel - inertial system with elektromashinnym converter electrical energy.

This setup has significant advantages in the case of the power supply system, where as a backup power source installed diesel power plants. To meet the requirements of consumers to quality electrical give reasons for disturbances in the system. To do this, a mathematical model that establishes a relationship between the parameters of the system and possible disturbances that may occur during system operation. The method of calculation of current spikes and voltage dips in the short-circuit and power failure in the mains lead. Recommendations regarding support for the required voltage quality, developed ways to control and circuit systems that implement them, the pilot study confirm the validity of the decisions taken.

Keywords: installation of uninterruptible power supply, uninterruptible power supply bus, electrotraction network, electrical power system

Вступ. Впровадження тягових підстанцій блочно модульних новітніх технологій з використанням мікропроконтролерів спонукає ріст кількості одиничної й сумарної встановленої потужності відповідальних електроприймачів, нормальна робота яких може бути забезпечена тільки в умовах гарантованого безперебійного живлення. Підвищення вимог цих електроприймачів до надійності і якості електроживлення зажадали у процесі розробки систем автоматизованого управління тягового електропостачання, вирішення питання безперебійного живлення таких електроприймачів.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Одночасно ускладнюються процеси перетворення енергії, розширюється різноманіття енергетичних установок та агрегатів, що забезпечують найбільш раціональні режими енергоживлення споживачів ВЛ СЦБ. Поряд зі зростанням кількісних показників енергозабезпеченості все більшу роль починають грати показники якості використання та споживання електричної енергії. Установки гарантованого живлення в ряді випадків, особливо пов'язаних з появою аварійних ситуацій, не дозволяють забезпечити

безперебійність електропостачання з підтримкою при цьому необхідних показників якості електричної енергії.

Визначення мети і задачі дослідження. Для з'ясування причини зниження показників якості електричної енергії в перехідних режимах роботи інерційних УГЖ і розробки рекомендацій із запобігання негативних ефектів необхідно встановити причинно - слідчі зв'язки, що спричиняють появу збурювань в системах електропостачання з такими УГЖ, і запропонувати заходи, впровадження яких забезпечить ослаблення або, по можливості, повне усунення небажаних збурювань.

Основна частина дослідження При зникненні напруги на введенні зовнішньої мережі здійснюється автоматичний перехід УГЖ [2,8,9] у режим «Автономія» шляхом вимикання вимикача мережного вводу, запуску дизеля й вмикання роз'єднувальної муфти. Такий перехід еквівалентний набросу навантаження на генератор і супроводжується провалом напруги на шинах гарантованого живлення (ШГЖ). При цьому напруга на ШГЖ може виявитися такою, що не буде задовольняти вимогам електроприймачів першої категорії. Величина провалу напруги буде визначатися величиною навантаження та величиною струму електричної машини[4,5]. Для розрахунку напруги на ШГЖ і визначення кидків струму при зміні режиму роботи УГЖ

проаналізуємо характер перехідного машини з однією обмоткою збудження й процесу. Аналіз роботи синхронної машини з аспокійливою обмоткою запишемо в виконаємо, використовуючи рівняння системі відносних одиниць у наступному Горева-Парка, які для явно полюсної виді:

$$\begin{aligned}
 -U_d &= r \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q; & -U_q &= r \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega\Psi_d; \\
 U_f &= r_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$0 = r_{rd} \cdot i_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt}; \quad 0 = r_{rq} \cdot i_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt};$$

U_f, U_d, U_q - напруга статорних обмоток в осях d та q й напруга обмотки збудження;

$\Psi_{2d}, \Psi_{2q}, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ - потокозчеплення статорних і роторних контурів;

r, r_f, r_{rd}, r_{rq} - активні опори статорних і роторних контурів;

i_d, i_q - проекції струму статора електричної машини на координатні осі d і q;

i_f, i_{rd}, i_{rq} - струми роторних контурів;

ω - кутова частота обертання.

Потокозчеплення визначаються по наступних формулах:

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= i_d x_d + i_f x_{ad} + i_{rd} x_{ad}; & \Psi_q &= i_q x_q + i_f x_{aq} + i_{rq} x_{aq}; \\
 \Psi_f &= i_d x_{ad} + i_f x_{ad} + i_{rd} x_{ad}; & \Psi_{rg} &= i_q x_{ad} + i_{rd} x_{rd}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де $x_d, x_q, x_f, x_{rd}, x_{rq}, x_{ad}, x_{aq}$ - реактивні опори синхронної машини.

Рівняння (1), необхідно доповнити рівняннями зв'язку, що визначають залежність напруги на ШГЖ від величини навантаження й струму генератора.

$$U_d = r_n i_d + x_n i_q; \quad U_q = r_n i_q + x_n i_d; \tag{3}$$

І рівнянням руху ротора:

$$Hj \frac{d\omega}{dt} = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q - M_g \tag{4}$$

де H_j - інерційна постійна;

$\Psi_q i_d - \Psi_d i_q = M_e$ - електромагнітний момент машини;

M_g - рушійний момент машини.

Рівняння (1), (2), (3), (4) утворюють систему диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес при зміні режиму роботи електричної машини. За допомогою цих рівнянь можливо охарактеризувати й коротке замикання на ШГЖ, поклавши в (3), що $r_n = x_n = 0$.

Рішення системи диференціальних рівнянь електричної машини по повним рівнянням Горева - Парка представляє відомі труднощі й для практичного завдання, що цікавлять нас, вихідні співвідношення можуть бути істотно спрощені. Це обумовлено наступними обставинами. Максимальні напруги й кидки струму при зміні режиму роботи УГЖ мають місце відразу ж після переходу електричної машини з режиму двигуна в генераторний режим після зникнення напруги на мережному введенні або безпосередньо відразу ж після короткого замикання на ШГЖ [12]. При цьому в початкові моменти кутова частота обертання вала практично

залишається постійною, а значить при дослідженні досить обмежитися аналізом характеру протікання електромагнітних перехідних процесів. Крім того в початкові моменти часу можна вважати, що потокозчеплення обмоток генератора мале і його можна не враховувати.

Допущення про сталість потокозчеплення для початкового етапу перехідного процесу дозволяє перейти від диференціальних рівнянь до алгебраїчних. Погрішність, пов'язана із цим, оцінена за допомогою інтеграційних рівнянь і не перевищує 5%. У результаті рішення алгебраїчних рівнянь виявляється можливим знайти складові шуканих змінних, рівні сталим значенням, які одержуються без врахування розсіювання енергії в системі. Оскільки попередні в перехідному процесі значення змінних можна вважати відомими, то виявляється можливим визначити аперіодичні складові шуканих величин. З огляду на прийняті допущення й виходячи із

того, що у вихідному сталому режимі роботи частота обертання дорівнює номінальному значенню $\omega_{ном}$, що відповідає в системі

відносних одиниць умові $\omega_{ном}=1$, одержуємо наступну систему рівнянь для визначення сталих значень струму електричної машини:

$$r_{\text{н}} i_{d\text{y}} + x_{\text{н}} i_{q\text{y}} = -\Psi_{\text{q}}; r_{\text{н}} i_{d\text{y}} + x_{\text{н}} i_{d\text{y}} = \Psi_{\text{d}} \quad (5)$$

Допущення про сталість потокозчеплень дозволяє затверджувати, що потокозчеплення в перший момент часу в генераторному режимі роботи електричної

машини рівні їхнім попереднім значенням для її роботи в режимі двигуна. Це означає, що

$$\Psi_{\text{q}} = i_{\text{q0}} x_{\text{q}}; \quad \Psi_{\text{d}} = i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}} \quad (6)$$

де i_{d0} , i_{q0} - значення струмів для роботи електричної машини в режимі двигуна.

Вирази (6) отримані з (2), оскільки в сталому режимі роботи $i_{\text{rd0}}=i_{\text{rq0}}=0$.

Підставляємо (6) в (5), одержуємо:

$$r_{\text{н}} i_{d\text{y}} + x_{\text{н}} i_{q\text{y}} = -i_{\text{q0}} x_{\text{q}}; r_{\text{н}} i_{d\text{y}} + x_{\text{н}} i_{d\text{y}} = i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}; \quad (7)$$

Вирішуючи (7), знайдемо $i_{d\text{y}}$ і $i_{q\text{y}}$

$$i_{d\text{y}} = -i_{\text{q0}} x_{\text{q}} g_{\text{н}} - (i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}) b_{\text{н}}; i_{q\text{y}} = -i_{\text{q0}} x_{\text{q}} g_{\text{н}} + (i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}) g_{\text{н}} \quad (8)$$

де $g_{\text{н}} = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}; b_{\text{н}} = \frac{x_{\text{н}}}{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}$

Амплітудні значення аперіодичних складових струмів i_{da} і i_{qa} знайдемо по наступних формулах:

$$i_{\text{da}} = i_{\text{d0}} - i_{d\text{y}} = i_{\text{q0}} x_{\text{q}} g_{\text{н}} + (i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}) b_{\text{н}} + i_{\text{d0}}; \\ i_{\text{qa}} = i_{\text{q0}} - i_{q\text{y}} = i_{\text{q0}} x_{\text{q}} b_{\text{н}} + i_{\text{q0}} + (i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}) g_{\text{н}} \quad (9)$$

Виходячи з того, що за час, рівний 0,01 с, загасання аперіодичної складової незначно, знайдемо величини початкових кидків струму:

$$i_{\text{d}} = -2i_{\text{q0}} x_{\text{q}} g_{\text{н}} - 2(i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}) b_{\text{н}} - i_{\text{d0}}; \\ i_{\text{q}} = -2i_{\text{q0}} x_{\text{q}} b_{\text{н}} + 2(i_{\text{d0}} x_{\text{d}} + i_{\text{f0}} x_{\text{ad}}) g_{\text{н}} - i_{\text{q0}}; \\ i_{\text{f0}} = \frac{E}{x_{\text{ad}}}, \quad 0.8 \leq E \leq 1.2 \quad (10)$$

Значення

i_{d0} і i_{q0} для вихідного стану, що передуює переходу в генераторний режим роботи, визначимо, виходячи з векторної діаграми генератора[2].

З векторних діаграм слідує,

$$i_{\text{f0}} = \frac{E - U \cos \theta_0}{x_{\text{ad}}}; \quad i_{\text{q0}} = \frac{U \sin \theta_0}{x_{\text{q}}}; \quad (11)$$

де θ_0 - кут між величинами E і U у вихідному режимі роботи.

З (11) видно, що початкові значення величини i_{d0} і i_{q0} визначаються величиною ЕРС E и активним навантаженням двигуна

P_0 , від якого залежить значення кута θ_0 . Між величинами P_0 і θ_0 існує наступний зв'язок:

$$P_0 = UI \cos \varphi = UI \cos(\psi_0 + \theta_0) = UI(\cos \psi_0 \cos \theta_0 - \sin \psi_0 \sin \theta_0) \quad (12)$$

З векторних діаграм маємо, що:

$$I_{\text{d}} = I \cdot \cos(\psi_0 - 90) = -I \sin \psi_0; I_{\text{q}} = I \cdot \sin(\psi_0 - 90) = -I \cos \psi_0; \quad (13)$$

Підставляючи (13) і (12), одержуємо:

$$P_0 = U(-I_{\text{q}} \cdot \cos \theta_0 + I_{\text{d}} \cdot \sin \theta_0) \quad (14)$$

Зв'язуючи (14) з (11), знайдемо:

$$P_0 = \frac{U \cdot E}{x_{\text{d}}} \sin \theta_0 = \frac{U^2 (x_{\text{d}} - x_{\text{q}})}{x_{\text{d}} \cdot x_{\text{q}}} \cdot \sin 2 \theta_0 \quad (15)$$

Вираз (15) дозволяє при відомих величинах P_0 , U_0 та E знайти величину кута навантаження θ_0 . Рішення (15) знаходимо шляхом графічної побудови

функції $P_0 = f(\theta_0)$. При цьому графіки $P_0 = f(\theta_0)$ будується для різних вихідних режимів роботи електричної машини, обумовлених станом кола збудження (величиною E ,

допустимий діапазоном зміни якої звичайно задають в інтервалі від 0,8 до 1,2). Залежність $P_0 = f(\theta_0)$ для різних значень E мають вигляд представлений на рис. 1. По графіках (рис.1), знаючи величину P_0 у відносних одиницях і попередній режим роботи, обумовлений величиною E , легко знайти шукане значення кута θ_0 (показано пунктиром на рис.1). При побудові графіків (рис. 1) вихідна величина напруги U на шинах гарантованого живлення прийнята рівною номінальній і рівній в системі відносних одиниць $U = 1$. При необхідності з'ясування впливу можливих коливань напруги зовнішньої мережі на роботу

електричної машини графіки, показані на рис, будують при $E = 1$ для можливого діапазону змін U , що лежить у границях $0,85 \leq U \leq 1,1$.

Після визначення величини кута θ_0 не представляє ускладнень обчислення значень i_{d0} та i_{q0} по формулах (11). Знайдені значення i_{d0} та i_{q0} підставляють в (10) та обчислюють початкові кидки струмів при зміні режиму роботи електричної машини. Для вихідного режиму роботи електричної машини на холостому ходу ($P = 0$) розглянута процедура істотно спрощується, оскільки $\theta_0 = 0$ і остільки:

$$i_{d0} = \frac{E-U}{x_d}; \quad i_{q0} = 0. \quad (16)$$

Для розрахунків величин i_d та i_q по формулах (10) необхідно представити

провідності навантаження q_n і b_n в відносних одиницях.

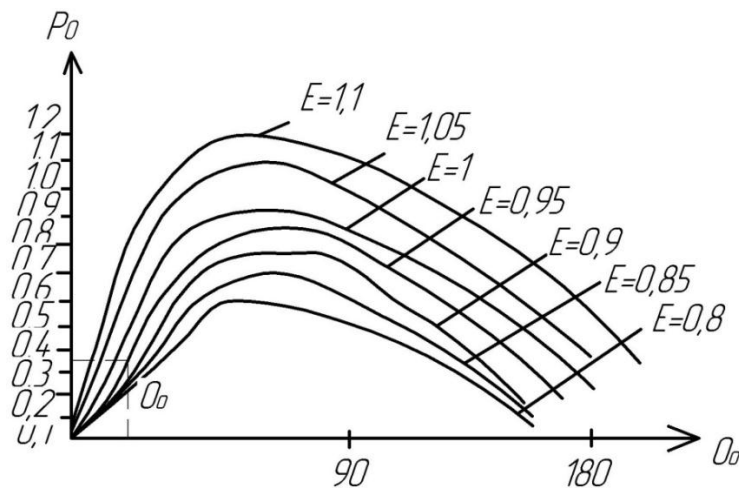


Рис. 1 Графіки функцій $P_0 = f(\theta_0)$ для різних режимів роботи електричної машини

Для цього необхідно зробити перерахунок опорів всіх елементів схеми системи електропостачання, що найчастіше має вигляд, наведений на рис. 2. На рис. 3 до ШГЖ підключені найбільш відповідальні електро приймачі $r_{n1} + jx_{n1}$, електроприймачі другої й третьої категорій $r_{n2} + jx_{n2}$ підключені з боку високої напруги трансформатора мережного уведення Т1 через свій понижувальний трансформатор Т2.

При зникненні напруги на мережному уведенні електроприймачі $r_{n1} + jx_{n1}$

та $r_{n2} + jx_{n2}$ одержують живлення від електричної машини. Розрахункова схема для визначення величин q_n та b_n при цьому приймає вид, показаний на рис. 3.

У розрахунковій схемі лінія електропередачі від ШГЖ до трансформаторів Т1 і Т2 представлена індуктивним опором x_l , а трансформатори Т1 і Т2 представлені опорами x_{T1} і x_{T2} . Опір

трансформатора у відносних одиницях обчислюється по формулі:

$$x_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном\ T}} \cdot \left(\frac{U_{ном\ T}}{U_6} \right) \quad (17)$$

За номінальну напругу трансформатора потрібно приймати номінальну напругу його первинної обмотки.

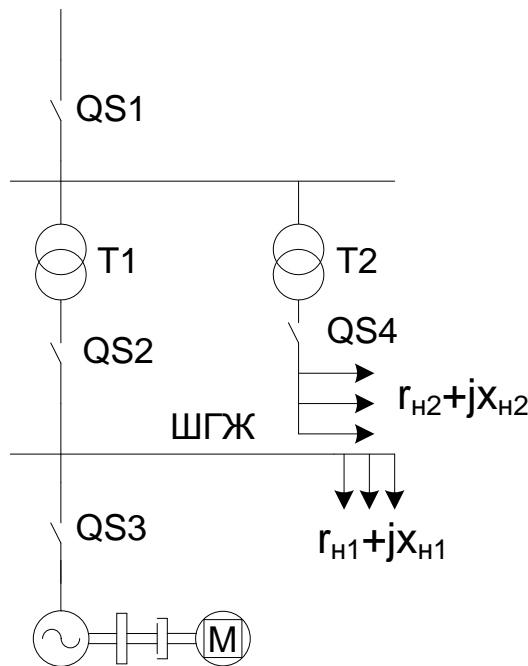


Рис. 2 Розрахункова схема системи електропостачання

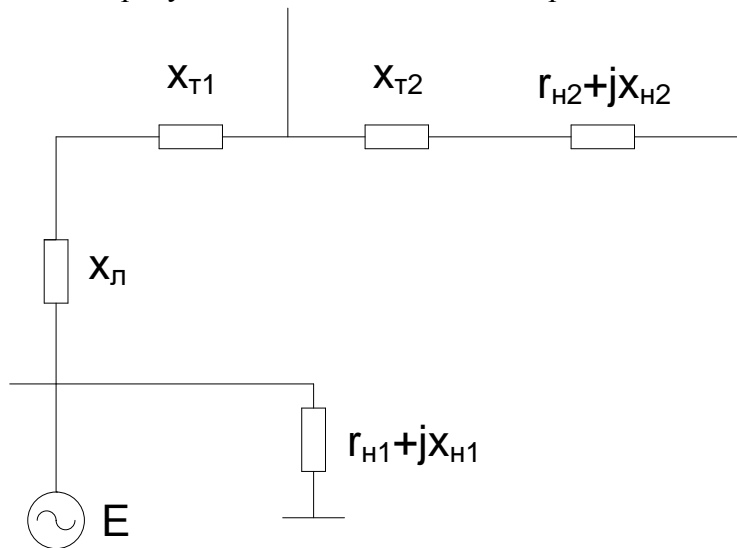


Рис. 3 Приведена розрахункова схема системи електропостачання

Опір лінії передачі у відносних одиницях обчислюється по формулах:

$$x_{л} = x_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2}; \quad r_{л} = r_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2} \quad (18)$$

Опір навантаження у відносних одиницях обчислюється по формулах:

$$x_n = x_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2}; \quad r_n = r_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2} \quad (19)$$

Після визначення всіх опорів приведення її до радіально - променевого розрахункової схеми (рис. 3) у відносних одиницях здійснюється спрощення схеми й визначення еквівалентного активного й реактивного опору навантаження,

обчислення для цих опорів провідностей q_n і b_n і обчислення по формулах (10) початкових кидків струму при зміні режиму роботи електричної машини. Після того, як величини i_d і i_q знайдені, по формулах (3)

легко обчислити величини U_d і U_q і приймаючи, що у вихідному режимі напруга на ШГЖ рівнялося номінальному значенню, знайти початковий провал напруги:

$$U = 1 - \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (20)$$

Як і початковий кидок струму, початковий провал напруги повністю визначається попереднім режимом збудження електричної машини й величиною навантаження. Застосовуючи спеціальні заходи, можна звести первинний провал напруги практично до нуля.

зміні режиму електричної машини прийнятна й для аналізу режиму трифазного короткого замикання на шинах гарантованого живлення. При прийнятих раніше допущеннях з (1) треба взяти до уваги, що в режимі трифазного короткого замикання:

Запропонована методика визначення первинних кидків струму при

$$\psi_q = i_{qy} \cdot x_q = 0; \psi_d = i_{dy} \cdot x_d + i_{j0} \cdot x_{ad} = 0. \quad (21)$$

З (21) маємо, що:

$$i_{dy} = 0; i_{dy} = -i_{f0} \frac{x_{ad}}{x_d} \quad (22)$$

Амплітудні значення аперіодичних складових i_{da} й i_{qa} знайдемо по формулах:

$$i_{da} = i_{d0} - i_{dy} = i_{d0} + i_{f0} \frac{x_{ad}}{x_d}; i_{qa} = i_{q0} - i_{qy} = i_{q0} \quad (23)$$

Зіставляючи (22) і (23), одержимо співвідношення для розрахунку початкових кидків струму при трифазному короткому замиканні:

$$i_d = -2i_{f0} \frac{x_{ad}}{x_d} - i_{d0}; i_{qa} = i_{q0} - i_{qy} = i_{q0} \quad i_q = -i_{q0} \quad (24)$$

Значення i_{d0} і i_{q0} визначається також, як і в розрахунку кидків струму при переході в генераторний режим роботи.

Величина i_{f0} визначається по формулі:

$$i_{f0} = \frac{E}{x_{ad}} \quad (25)$$

де E - ЕРС електричної машини у відносних одиницях, $0,8 \leq E \leq 1,2$.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Під час розробки даної статті були з'ясувані причини зниження показників якості електричної енергії в перехідних режимах роботи інерційних УГЖ і розроблені рекомендації із запобігання

негативних ефектів, встановлені причинно - слідчі зв'язки, що спричиняють появу збурювань в системах електропостачання з такими УГЖ, і запропоновані заходи, впровадження яких забезпечить ослаблення або, по можливості, повне усунення небажаних збурювань.

Список використаних джерел

1. Марикин, А.Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций[Текст]/А.Н. Марикин, А.В. Мизинцев.- Москва.: Маршрут, 2008.- 220с.
2. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Л.: Энергия, 1964, 281 с.
3. Хмельник С.И. Электрические цепи постоянного тока для моделирования и управления. Алгоритмы и аппаратура. Published by "MiC" - Mathematics in Computer Comp., printed in USA, Lulu Inc. Израиль-Россия, 2004, 174 с.
4. Кононов Б.Т., Супрун О.Д. Система гарантированного питания А.С. СССР 1576987 от 16.03.1988 г. – БИ № 25, 1990.
5. Лущик В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты / В.Д. Лущик. – К.: Технка, 993. – 203 с.

6. В.М. Аванесов, зав. кафедрой «Энергетика и энергосбережение» Московского института энергобезопасности и энергосбережения, научная статья «Стационарные дизель электростанции»

7. Быков Евгений Александрович. Разработка принципов построения систем гарантированного электроснабжения промышленных предприятий : Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 : Москва, 2005 137 с. РГБ ОД, 61:05-5/2029

8. Апигов В. Р., Тумасянц Р. А., Бабкин В. А., Кравченко С. В. Способы организации бесперебойности в корабельных агрегатах электропитания // Силовая электроника корабельных электротехнических комплексов: Материалы межотраслевого научно-технического семинара/ Новочеркасск, 2007. – С. 133-144

9. Губанов Ю. А., доктор техн. наук, профессор, ОАО «Концерн «НПО «Аврора», научная статья «Агрегаты бесперебойного питания различного назначения»

10. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 . Основы применения. Серия библиотека профессионала – М.:СОЛОН – Пресс, 2005.- 800 с.: ил.

11. Волокитина е.В., к.т.н., Никитин В.В., Опалев Ю.Г., Тебеньков Ф.Г. ОАО «Электропривод», г. Киров. Научная статья «имитационная математическая модель синхронной магнитоэлектрической машины в генераторном режиме в среде Matlab Simulink»

Рецензент докт. техн. наук професор Крашенінін О.С.

Suprun Oleksandr Danilovich, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту

Tel.: 067 57 66 174 Email: suprun_od@mail.ru

Kovalenko Oleksij Vitalijovich, магістр кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту

Tel.: 099 02 54 034 Email: alex.kovaleno.1993@mail.ru

Suprun Oleksandr Danilovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor Department automated electric vehicle Ukrainian State Academy of Railway Transport

Tel.: 067 57 66 174 Email: suprun_od@mail.ru

Kovalenko Oleksij Vitalijovich, master Department automated electric vehicle Ukrainian State Academy of Railway Transport

Tel.: 099 02 54 034 Email: alex.kovaleno.1993@mail.ru

Стаття поступила 19.05.2015

УДК 621.316

ШВИДКОДІЮЧИЙ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ ВУЗЛОВИХ СХЕМ ЖИВЛЕННЯ РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖ

К-т техн. наук В.М. Баженов, ст. виклад М.М. Одегов

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА УЗЛОВЫХ СХЕМ ПИТАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

К-т техн. наук В.Н. Баженов, ст. преподав. Н.Н. Одегов

THE QUICK-OPERATED PROTECTION RELAY FOR THE NODAL POWER CIRCUIT OF DISTRIBUTION NETWORKS

Candidate of techn. sciences V. N. Bazhenov, senior lecturer N.N. Odegov

Визначені критерії та алгоритми функціонування релейного захисту для швидкого вимкнення пошкоджень в розподільних електричних мережах 6 – 35 кВ в межах ступені селективності 0,3 – 0,5 с. Запропоновано два способи швидкого вимкнення пошкоджень в

розподільних мережах: перший – пов'язаний з новим рівнем управління аварійними режимами за допомогою реклоузерів. Другий – погоджена дія засобів релейного захисту і автоматики. Сформульовані основні умови функціонування захисту розподільної мережі з двостороннім живленням. Умови спрацьовування захисту визначені нормованою чутливістю до пошкоджень. Умови неспрацьовування захисту задані відстроєністю від зовнішніх пошкоджень і всі види захисту – від максимального робочого режиму розподільної мережі. Розглянуті умови спрацьовування і неспрацьовування застосовні для всіх видів технічних засобів релейного захисту, у тому числі – електромеханічних, які можуть бути використані для вибору умов роботи систем безпеки інтелектуальних систем автоматизації розподільних мереж 6 – 35 кВ.

Ключові слова: релейний захист, пошкодження, реклоузер, розподільні мережі.

Определены критерии и алгоритмы функционирования релейной защиты для быстрого отключения поврежденных в распределительных электрических сетях 6 – 35 кВ в пределах ступени селективности 0,3 – 0,5 с. Предложены два способа быстрого отключения поврежденных в распределительных сетях: первый – связан с новым уровнем управления аварийными режимами с помощью реклоузеров. Второй – согласованное действие средств релейной защиты и автоматики. Сформулированы основные условия функционирования защиты распределительной сети с двухсторонним питанием. Условия срабатывания защит определены нормированной чувствительностью к повреждениям. Условия несрабатывания защит заданы отстроенностью от внешних повреждений и все виды защит – от максимального рабочего режима распределительной сети. Рассмотренные условия срабатывания и несрабатывания применимы для всех видов технических средств релейной защиты, в том числе – электромеханических, которые могут быть использованы для выбора условий работы систем безопасности интеллектуальных систем автоматизации распределительных сетей 6 – 35 кВ.

Ключевые слова: релейная защита, повреждение, реклоузер, распределительные сети.

Electric distributive networks by voltage of 10 - 35 кV are the basic parts of power supply of all electric power users . Statistically they are one of the most damaged electric networks, including for the railway transport of Ukraine. There is 60% from the all damages of all electric networks. With the purpose of decline of harm from violation of insufficient power supply of the users new untraditional methods and technical tools of intelligent control systems by electric distributive networks are supplied. For realization of the conception Smart Grid intelligent technology is used in an electroenergy. It provide complex application of tools for reliability and safety systems of power supply of electric power users. Criteria and algorithms of functioning of relay protection are given for the rapid disconnecting of damages in distributive electric networks 6 – 35 кV within the [grading margin time](#) during 0,3 – 0,5 sec. Two methods of the rapid disconnecting of damages are offered in distributive networks. The first method is related to the new level of management malfunctions by the recloser. It supposes introduction of fifth-generation of hardwares of relay protection and automation. It is microprocessors of making decision, processors of recognition of situations. Connections between the microprocessors of making decision provide functions absolutely selective protection. The backing-up is arrived at adjacent off-delay protection of disconnecting of switch in a basic area. Second is the coordination of tools of the relay protection and the automation. Basic conditions of protection of distributive network with a two-sided feed are formulated. The terms of tripping of protection are determined by the damage sensitiveness. The terms of the [unavailability](#) of protection are offset from external damages (current cut-off, 1 and 2 areas of the distance protection) and all types of protection – from the maximal operating condition of distributive network. The considered terms of the tripping and the [unavailability](#) are applicable for all types of hardwares of relay protection, including – electromechanics, which can

be used for the choice of terms of work of the systems of safety of the intellectual systems of automation of distributive networks of 6 – 35 kV.

Keywords: relay protection, damage, recloser, rapredelitelnye network

Постановка проблеми. Електричні розподільні мережі напругою 6 - 35 кВ є основною ланкою електропостачання усіх споживачів електроенергії і за статистикою одні з тих електричних мереж України, що найбільше ушкоджуються. На їх долю припадає 60% від загального числа ушкоджень всіх електричних мереж. Розподільні електричні мережі забезпечують електропостачання таких споживачів як: населені селища і райони міст, підприємства газової і нафтової галузей, залізничного транспорту, промисловості та ін. Зараз у зв'язку з новими вимогами до зниження збитків від порушення електропостачання вказаних споживачів намітився пошук нових нетрадиційних методів і технічних засобів інтелектуалізації систем управління електричними розподільними мережами. Для реалізації концепції інтелектуалізації в електроенергетиці в даний час застосовується технологія Smart Grid, що передбачає комплексне застосування всіх засобів для надійності та безпеки систем електропостачання споживачів електроенергії. Тривалість вимкнення пошкоджень в розподільних мережах 6 – 35 кВ, що працюють з ізольованими або резонансно – компенсованими нейтраліями, складається з часу спрацьовування захисту і власного часу вимкнення вимикачем навантаження.

Аналіз останніх досліджень. Вимога до швидкості дії релейного захисту визначається параметрами електроустановки, величинами термічної і динамічної стійкості, щоб за час дії захисту в електроустановці не сталися значні пошкодження, а також не порушилася стійка робота рухового навантаження, не знизилася напруга нижче допустимого рівня та ін. Для певних електроустановок [1] допустимий час спрацьовування релейного захисту не повинен перевищувати ступені селективності, рівної 0,3 – 0,5 с.

Мета статті. Визначити способи та алгоритми функціонування релейного захисту для швидкого вимкнення

пошкоджень в розподільних електричних мережах 6 – 35 кВ в межах ступені селективності.

Основні матеріали дослідження. Найкращий спосіб пов'язаний з новим рівнем управління аварійними режимами розподільних мереж за допомогою технології SMART CRID [2 – 7] – це впровадження п'ятого покоління технічних засобів релейного захисту і автоматики [8 – 9], які будуть працювати на мікропроцесорах ухвалення рішень (МУР), процесорах розпізнавання ситуацій. Особливість архітектури релейного захисту і автоматики п'ятого покоління в тому, що відповідні дії здійснюються мікропроцесорами ухвалення рішень, що підключаються до вимірювальних трансформаторів струму і напруги з кожного боку відповідного вимикача всіх приєднань. Кожен мікропроцесор ухвалення рішень розпізнає ситуацію електричної мережі відносно свого вимикача в зонах “справа” і “зліва” – “за спиною” і повинен діяти на вимкнення лише свого вимикача. МУР всіх вимикачів зв'язуються цифровими волоконно – оптичними каналами, високочастотними або радіоканалами для створення абсолютно селективного захисту без витримки часу елементів розподільної мережі за принципом віртуального диференційного струмового захисту (ВДСЗ). Якщо відмовлять всі канали зв'язку з суміжними вимикачами, то МУР діє як автономний релейний захист четвертого (мікропроцесорного) покоління, розпізнає ситуацію в електричній мережі по обидві сторони лише свого вимикача. Завдяки зв'язкам між мікропроцесорами ухвалення рішень, які йдуть від вимикача до вимикача, абсолютно селективні захисти резервуються суміжними захистами із затримкою на тривалість вимкнення вимикача в основній зоні згідно протоколу МЕК 61850 [10].

Другий спосіб – погоджена дія засобів релейного захисту і автоматики. Вживання лише максимального струмового захисту не дає бажаних результатів в швидкому вимкненні пошкоджень. Так, в [11] для

прискорення захисту ліній електропередачі з однобічним живленням пропонується застосовувати замість триступінчатого струмового захисту – двоступінчатий струмовий захист: перший рівень – струмове відсічення без витримки часу, другий – струмовий захист із залежною характеристикою спрацьовування.

Проте, як і для всіх максимальних струмових захистів, тут характерний вплив режимів роботи джерел живлення розподільної мережі (наприклад, із збільшенням опору енергосистеми, у тому числі живлячого силового трансформатора, час спрацьовування захисту теж збільшується). З метою зниження тривалості пошкоджень, використовуючи можливості автоматизації розподільних мереж на базі реклоузерів, нами пропонується застосовувати погоджену дію релейного захисту і автоматики в наступному об'ємі: струмове відсічення без витримки часу (ТО); перша зона дистанційного захисту (ДЗ1); друга зона дистанційного захисту (ДЗ2); третя зона дистанційного захисту (ДЗ3); максимальний струмовий захист (МЗ); автоматичне повторне ввімкнення (АПВ) і автоматичне включення резерву (АВР). Дистанційні захисту ДЗ1 – ДЗ3 повинні автоматично резервуватися триступінчатим струмовим захистом, який включається в роботу при глибоких посадках напруги в місцях установки захисту. Сформулюємо основні технічні можливості вказаних пристроїв захисту і автоматики. ТО – миттєвий захист з нормованою чутливістю в межах 40% об'єкту, що захищається; ДЗ1 – теж миттєвий захист з нормованою чутливістю, але в межах 85 – 90% свого об'єкту захисту; ДЗ2 – 100% захист для свого об'єкту; ДЗ3 – резерв 100% до захисту свого і суміжного об'єктів; МЗ – резерв 100% до захисту свого об'єкту. Основне призначення струмового відсічення – перекривати мертві зони по напрузі першого рівня дистанційного захисту. Швидке відключення пошкоджень може дати неселективний релейний захист з подальшим виправленням її неселективності за рахунок використання АПВ, що дозволяє прискорюватися захисту до дії АПВ. Застосовується прискорення дії релейного захисту після циклу АВР. У

розподільних мережах з двостороннім живленням можна використовувати АПВ з контролюми напруги і синхронізму джерел живлення, і прискорення нижчих по сигналах від вищих рівнів протилежного захисту.

Для розгляду умов функціонування релейного захисту розподільної мережі з двостороннім живленням (шини А – пункт секціонування ПС – шини В) вибрані розрахункові точки короткого замикання: К1 – пошкодження на початку лінії А – ПС, поблизу вимикача фідера $QA1$; К2 – пошкодження в кінці лінії А – ПС, поблизу пункту секціонування і вимикача $QPC1$; К3 – пошкодження на початку суміжної лінії ПС – В, поблизу вимикача пункту секціонування $QPC2$; К4 – пошкодження в кінці суміжної лінії ПС – В, поблизу шин В і вимикача $QB1$; К5 – пошкодження поблизу шин, А ” за спиною” для вимикача фідера $QA1$.

Позначимо коефіцієнти, використовувані в умовах спрацьовування і неспрацьовування пристроїв релейного захисту: k_{H1} – коефіцієнт надійного відстроювання (умова неспрацьовування) захисту від максимального струму к.з. в кінці об'єкту захисту; k_{H2} – коефіцієнт надійного відстроювання (умова неспрацьовування) захисту мінімального опору від пошкоджень в кінці об'єкту захисту; k_3 – коефіцієнт запасу для умов неспрацьовування захисту і блокувань в максимальних режимах мережі; k_B – коефіцієнт повернення захисту мінімального типу;

k_{B1} – коефіцієнт повернення захисту максимального типу; k_4 – нормований коефіцієнт чутливості (умова спрацьовування) для струмового відсічення і третього рівня дистанційного захисту; k_{41} – нормований коефіцієнт чутливості (умова спрацьовування) для другого рівня дистанційного захисту до пошкоджень в кінці об'єкту захисту; k_{42} – нормований коефіцієнт чутливості (умова спрацьовування) для третього рівня дистанційного захисту до пошкоджень в кінці об'єкту захисту.

Запропоновані умови функціонування захисту ділянки розподільної мережі: шини А – пункт секціонування ПС. *Струмове відсічення.* Даний захист з абсолютною

селективністю не повинен спрацьовувати при пошкодженнях на кордоні суміжних приєднань в точці К2 в максимальному режимі роботи прилеглої електричної мережі по формулі:

$$I_{T0} \geq k_{H1} \cdot I_{K2. \max} , \quad (1)$$

де $I_{K2. \max}$ – струм вимикача QA1 при к.з. у точці К2 в максимальному режимі роботи прилеглої електричної мережі.

Дія захисту визначається забезпеченням нормованої чутливості до пошкоджень в місці установки захисту:

$$k_{\text{ч}} = I_{K1. \min} / I_{T0} \geq 1,2 , \quad (2)$$

де $I_{K1. \min}$ – струм вимикача QA1 при к.з. у точці К1 в мінімальному режимі роботи прилеглої електричної мережі.

Додатково захист не повинен спрацьовувати під час максимальних режимів навантажень і пошкодженнях "за спиною":

$$I_{T0} \geq k_3 \cdot I_{P. \max} , \quad (3)$$

де $I_{P. \max}$ – розрахункове значення максимального струму в робочому режимі розподільної мережі,

$$I_{T0} \geq k_3 \cdot I_{K5. \max} , \quad (4)$$

де $I_{K5. \max}$ – струм вимикача QA1 при к.з. у точці К5 в максимальному режимі роботи джерела В.

Якщо умови(3 або 4) не дотримуються, то струмове відсічення має бути відповідно спрямоване у вигляді сектора $55 - 120^\circ$ або $0 - 120^\circ$.

Струмове відсічення виконується миттєвим, без витримки часу $t_{CP}=0$, оскільки селективність забезпечується вибором струму спрацьовування захисту.

1 зона дистанційного захисту. Уставка даного захисту з абсолютною селективністю вибирається по умові неспрацьовування від опору, вимірюваного 1 зоною захисту, при к.з. в кінці лінії, що захищається, А – ПС:

$$Z_{ДЗ1} \leq k_{H2} \cdot Z_{K2. \min} , \quad (5)$$

де $Z_{K2. \min}$ – опір, вимірюваний першим рівнем, при к.з. в кінці лінії А – ПС в режимі максимуму енергосистеми.

Також захист не повинен спрацьовувати від максимальних режимів навантажень:

$$Z_{ДЗ1} \leq Z_{P. \min} / k_3 , \quad (6)$$

де $Z_{P. \min}$ – мінімальний опір, вимірюваний захистом, в робочому максимальному режимі мережі.

Характеристика захисту в комплексній площині – не спрямоване, у вигляді кола з центром на початку координат $\varphi_{CP} = 0 - 360^\circ$.

Властивість спрямованості забезпечується струмовим блокуванням. ДЗ1 виконується без витримки часу $t_{CP}=0$.

Струмове блокування. Застосовується для першого рівня дистанційного захисту фідера розподільної мережі. Уставка струмового пуску вибирається більше струму у вимикачі QA1 при к.з. К5:

$$I_{BT} \geq k_3 \cdot I_{K5. \max} , \quad (7)$$

де $I_{K5. \max}$ – розрахунковий струм вимикача QA1 при к.з. у точці К5 рівний струму від підстанції В в максимальному режимі роботи підстанції і прилеглої електричної мережі. *2 зона дистанційного захисту.* Захист повинен захищати 100 % своїй лінії з нормованою чутливістю до пошкоджень на всій ділянці А – ПС:

$$Z_{ДЗ2} \geq k_{\text{ч}1} \cdot Z_{K2. \max} , \quad (8)$$

де $Z_{K2. \max}$ – опір пошкодження в точці К2, який вимірюється другим рівнем дистанційного захисту в режимі мінімуму енергосистеми А.

Проте, захист не повинен спрацьовувати під час максимального робочого режиму мережі з врахуванням повернення даного захисту після відключення пошкодження на суміжній лінії своїм основним захистом:

$$Z_{ДЗ2} \leq Z_{P. \min} / (k_3 \cdot k_B) , \quad (9)$$

де $Z_{P. \min}$ – мінімальний опір, вимірюваний захистом, в робочому максимальному режимі розподільної мережі.

Характеристика 2 зони захисту – спрямована, у вигляді сегменту кола з кутом $\varphi_{CP} = 0 - 120^\circ$ у 1 і 2 квадрантах комплексної площинності. Витримка часу приймається рівному ступеню селективності з метою резервування першої зони.

3 зона дистанційного захисту. Бажано, щоб захист відчував пошкодження на суміжній лінії ПС – В в режимі мінімуму живлячої енергосистеми:

$$Z_{ДЗЗ} \geq k_{ч} \cdot Z_{K4. max} , \quad (10)$$

де $Z_{K4. max}$ – опір пошкодження в точці K4, який вимірюється третьою зоною дистанційного захисту в режимі мінімуму енергосистеми А і з врахуванням активного опору дуги (5 – 8 Ом) в місці пошкодження. Обов'язково 3 зона дистанційного захисту повинна відчувати пошкодження на шинах пункту секціонування в розрахунковій точці K2:

$$Z_{ДЗЗ} \geq k_{ч2} \cdot Z_{K2. max} , \quad (11)$$

де $Z_{K2. max}$ – опір пошкодження в точці K2, який вимірюється 3 зоною дистанційного захисту в режимі мінімуму енергосистеми А і з врахуванням активного опору дуги (5 – 8 Ом) в місці пошкодження.

Як правило, уставка 3 зони дистанційного захисту по абсолютному значенню не може бути відбудована від мінімального опору $Z_{P. min}$ в робочому максимальному режимі розподільної мережі. Тому відстроювання від цього режиму можливе за рахунок кутової характеристики захисту у вигляді сектора 55 – 120 град. *Максимальний струмовий захист.* Захист повинен спрацьовувати при всіх пошкодженнях на своїй лінії (100 % захист) по умові забезпечення нормованої чутливості до пошкоджень на шинах пункту секціонування в розрахунковій точці K2:

$$I_{МЗ} \leq I_{K2. min} / k_{ч1} , \quad (12)$$

де $I_{K2. min}$ - струм вимикача QА1 при к.з. у точці K2 в мінімальному режимі роботи мережі.

Перевіряється захист по умові неспрацьовування після вимкнення суміжними захистами пошкодження на всій розподільній мережі:

$$I_{МЗ} \geq k_3 \cdot I_{P. max} / k_{В1} , \quad (13)$$

де $I_{P. max}$ – розрахункове значення максимального струму в робочому режимі. Даний захист є другим рівнем струмового захисту і виконує функції ближнього і далекого резервування. Розглянуті умови функціонування релейного захисту розподільної мережі з двостороннім живленням у поєднанні з пристроями автоматики дозволяють вимкати пошкодження часом до рівня селективності, застосовуючи прискорення протилежних чутливих захистів, котрі мають найбільші затримки часу.

Висновки. Запропоновано два способи швидкого вимкнення пошкоджень в розподільних мережах: перший – пов'язаний з новим рівнем управління аварійними режимами за допомогою реклоузерів. Другий – погоджена дія засобів релейного захисту і автоматики. Сформульовані основні умови функціонування захисту розподільної мережі з двостороннім живленням. Умови спрацьовування захисту визначені нормованою чутливістю до пошкоджень. Умови неспрацьовування захисту задані відстроєністю від зовнішніх пошкоджень (струмове відсічення, 1 і 2 зони дистанційного захисту) і всі види захисту – від максимального робочого режиму розподільної мережі. Розглянуті умови спрацьовування і неспрацьовування застосовні для всіх видів технічних засобів релейного захисту, у тому числі – електромеханічних, які можуть бути використані для вибору умов роботи систем безпеки інтелектуальних систем автоматизації розподільних мереж 6 – 35 кВ.

Список використаних джерел

1. Фигурнов Е.П. Релейная защита : учебник для вузов железнодорожн. трансп. / Е.П. Фигурнов – М. : Желдориздат, 2002. – 720 с.
2. Симонов А. Новый уровень управления аварийными режимами распределительных сетей с помощью реклоузеров // Электрик. 2012. №12. – С. 12-18.
3. SMART CRID [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
4. Delfino B. Load – Frequency Control: new perspectives in the open access environment // B. Delfino, F. Formari, S. Massuco / IEEE, 2000, vol.3, P. 1866 – 1871.
5. Barsali S, Control techniques of Dispersed Generators to improve the continuity of electricity supply // S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi / IEEE, 2002, vol.2, P. 789 – 794.
6. European SmartGrids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe’s Electricity Networks of the Future. – Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006, 40 p.
7. Smart Power Grids – Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.
8. Силаев Ю. Релейная защита от плавкой вставки до микропроцессора // Релейная защита и автоматизация. 2012. №01 (06). – С.48-53.
9. Микропроцессорная защита распределительной сети 10 – 35 кВ / Баженов В.Н., Эхсони Субхон //Тези доповідей ХХ111 міжнародної науково-практичної конференції Ч.2 (20-22 травня 2015р, Харків) / за ред проф Сокола Е.І- Харків, НТУ “ХПІ”–С. 162–163.
10. Brunner C. , Apostolov A. IEC 61850 Brand New World Magazine. Summer 2007.
11. Гарке В., Исаков. Р. Ступенчатые токовые защиты распределительных сетей с зависимой характеристикой срабатывания // Релейная защита и автоматизация. 2011. №01 (02). – С. 22-26.

Баженов Володимир Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації енергосистем, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, тел. 7076551, fider 41@ mail.ru

Одегов Микола миколайович, ст. викладач кафедри автоматизовані системи електричного транспорту, Українського державного університета залізничного транспорту, тел 7301075, ел. пошта 8084214@ukr.net

Стаття постуила 21.05.2015

УДК 629.4.014

СИСТЕМА МОНИТОРИНГУ СТАНУ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ РУХОМОГО СКЛАДУ

Канд. техн. наук С.І. Яцько, аспірант Я.В. Ващенко

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Канд. техн. наук С.И. Яцько, аспирант Я.В. Ващенко

MONITORING SYSTEM OF ASYNCHRONOUS TRACTION ELECTRIC RAIL VEHICLE

PhD in Technical Science S.I. Yatsko, Y.V. Vashchenko

Приведено результати досліджень з розроблення методу безперервного контролю технічного стану тягового асинхронного електропривода. Запропонована система безперервного контролю і діагностування технічного стану заснована на методі частотного аналізу складу вхідного струму автономного інвертора тягового

електропривода. Визначення порушень справного стану засновано на принципі смугового фільтра.

Ключові слова: тяговий асинхронний електропривід, несправності, система моніторингу, спектральний аналіз, смуговий фільтр.

Приведены результаты исследований по разработке метода непрерывного контроля технического состояния тягового асинхронного электропривода. Предложена система непрерывного контроля и диагностики технического состояния основана на методе частотного анализа состава входного тока автономного инвертора тягового электропривода. Определение нарушений исправного состояния выполнено на принципе полосового фильтра.

Ключевые слова: тяговый асинхронный электропривод, неисправности, система мониторинга, спектральный анализ, полосовой фильтр.

At present, given the continuous improvement process of asynchronous traction electric drive becomes especially important task of developing common methods for the study of emergency operation, construction principles and practical recommendations for the creation of effective protection systems equipment rolling stock with induction motors.

This paper shows the results studies of the development for a continuous condition monitoring method asynchronous traction electric drive. The proposed system of continuous monitoring and diagnosing technical state based on the frequency analysis method for the input current autonomous electric traction inverter. Definition violations healthy state based on the principle of a bandpass filter.

Development of the protection system based on the proposed principles continuous monitoring and fault detection equipment for electric traction in the early stages of development will help minimize costs and prevent disruption of traffic.

Keywords: asynchronous electric traction, faults, monitoring system, spectral analysis, bandpass filter.

Вступ. Як правило, висока вартість тягового асинхронного електроприводу та не менш високі витрати на його утримання в працездатному стані обумовлюють необхідність проведення досліджень, результатами яких є розробки заходів по зниженню експлуатаційних витрат. Основною метою проведених досліджень є удосконалення системи моніторингу стану об'єкта для упередження (виявленню на початковому етапі) як самих відмов так і локалізацію місця їх зародження.

Аналіз публікацій, що з'являються в останні роки [1-3], свідчить про зростаючий інтерес дослідників та проектувальників до проблем діагностування обладнання рухомого складу.

На сьогоднішній день переважного поширення набули методи розпізнавання технічного стану шляхом статистичних, стендових та автоматизованих випробувань [4]. Однак очевидним є факт, що найбільш достовірну й оперативну інформацію про технічний стан можна отримати за допомогою безперервних бортових

технічних систем. Їх функціонування може бути побудоване на певних способах ідентифікації стану за діагностичними параметрами шляхом оцінки відхилень за контрольними рівнями, розкладенням функцій у ряд Фур'є, розпізнаванням за комплексом ознак та інших [5-6].

Завершальною стадією обробки вхідної інформації є методика прийняття рішення про справний технічний стан, існування несправності або її прогнозуєчі ознаки. Як правило, проведення діагностики стану об'єкта потребує наявності діагностичних моделей, до яких висувається ряд вимог. Однією з таких вимог є вимога щодо їх технічної та практичної реалізації.

Мета роботи. Розроблення методу неперервного контролю та діагностування технічного стану тягового асинхронного електропривода.

Результати досліджень. При постановці задачі дослідження аварійних станів та захистів тягового електрообладнання виникає необхідність визначення базової структури тягового

приводу, умов виникнення та характерних особливостей розвитку відмов [7-9]. З точки зору аналізу можливих аварійних станів та реалізації захисту в складі системи тягового асинхронного електроприводу можна виділити наступні підсистеми (рис. 1): підсистема первинного енергозабезпечення

(тяговий трансформатор - чотириквADRANTНИЙ перетворювач (вхідний перетворювач)), проміжна ланка (резонансний фільтр - головний фільтр), підсистема «автономний інвертор напруги – тяговий асинхронний двигун» (АІН-ТАД).

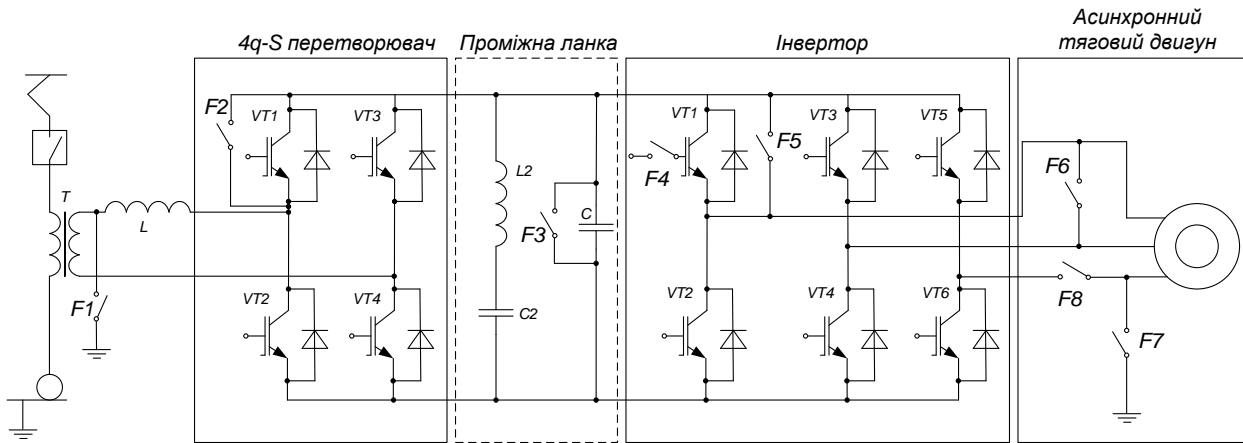


Рис.1. Спрощена схема системи тягового електроприводу для дослідження аварійних режимів

Розподіл аварійних станів по ступені розвитку дозволяє сформуванню підходу по дослідженню аварійних станів та реалізації засобів захисту на кожній стадії розвитку аварійного процесу (в тому числі і запобіжних заходів, що спрацьовують на ранніх стадіях розвитку відмови). Таким чином, в системі асинхронного тягового електроприводу можуть мати місце наступні випадки несправностей:

- Замикання на землю вхідної живлячої лінії F1;
- Коротке замикання елемента випрямляча F2;
- Коротке замикання ланки конденсатора постійного струму F3;
- Обрив управляючої бази транзистора F4;
- Коротке замикання транзистора F5;
- Коротке замикання лінія-на-лінію на виводах двигуна F6;
- Замикання однієї лінії на землю на виводах двигуна F7;

- Обрив однієї фази на виводах двигуна F8 та ін.

В основі класифікації аварійних станів в підсистемі АІН-ТАД можна покласти наступні класифікаційні ознаки, що дозволяють на етапі розробки засобів захисту асинхронного електроприводу сформуванню принципи побудови та видати практичні рекомендації по їх реалізації.

По характеру відмов: на аварійні стани, що характеризуються незворотними відмовами (через вихід з ладу елементів інвертора) та умовно-зворотними відмовами (виникають при порушенні операцій, передбачених програмою роботи установки, або при помилкових вклученнях транзисторів силової схеми). При умовно зворотних відмовах обладнання, як правило, не виходить з ладу, і після спрацювання захисту установка може нормально працювати. Досвід експлуатації тягових перетворювачів показує що переважна більшість первинних відмов є умовно-зворотними, які, проте, при певних умовах призводять до незворотних відмов.

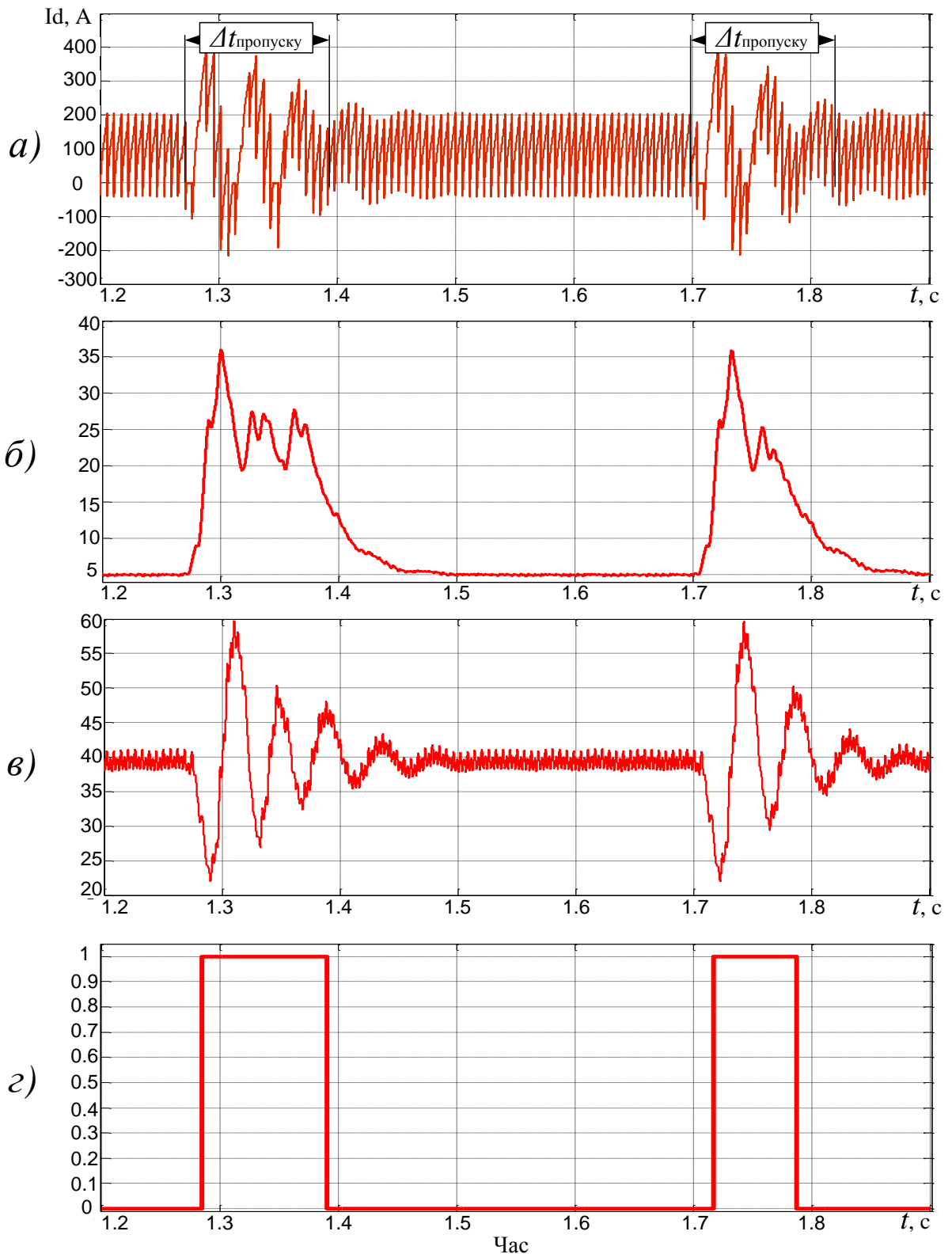


Рис.2. Виявлення несправності пропуску імпульсу управління ключа: а) вхідний струм інвертора; б) сигнал на виході 1го смугового фільтра; в) сигнал на виході 2го смугового фільтра; г) імпульси системи розпізнавання несправності.

Запропонована система неперервного контролю та діагностування технічного стану тягового асинхронного електропривода побудована на базі діагностичних моделей. При цьому слід зазначити, що при розробленні діагностичних моделей, як правило, математичний опис процесів у тяговому електроприводі не може бути безпосередньо використаний як діагностична модель, так як зазвичай він адекватний штатним режимам і не працює в нештатних ситуаціях. Тому розв'язання цієї задачі було знайдено шляхом використання як діагностичної моделі для випадку нормального функціонування об'єкта, так і моделей, які описують конкретну нештатну ситуацію.

Один з варіантів структурної схеми такого модуля моніторингу та діагностики приведено [10]. Згідно зі структурною схемою, відхилення процесів від діагностичної моделі виявляє факт виникнення нештатної ситуації. Тобто, якщо невідповідності виходів об'єкта у та моделі y , яка відповідає нормальній роботі об'єкта, перевищують деякий поріг, то порушення в роботі об'єкта вважаються виявленими. Це викликає активізацію моделей, що описують порушення в об'єкті. При цьому ті порушення, що описуються найбільшою невідповідністю вважаються найбільш імовірними.

Ураховуючи специфіку побудови та роботи системи асинхронного електропривода, було запропоновано проводити оцінку технічного стану системи шляхом аналізу спектрального складу струму на вході інвертора. На основі зазначеного шляхом моделювання були розроблені діагностичні моделі як для випадку нормального функціонування об'єкта, так і моделі, які описують конкретну нештатну ситуацію.

Алгоритм виявлення несправностей у роботі системи тягового електропривода на основі аналізу спектра вхідного струму інвертора може бути таким. При відомій частоті живлення асинхронного двигуна та його навантаженні в квазістаціонарному режимі спектр частот реальної системи

електропривода порівнюється зі спектрами частот відповідних діагностичних моделей несправностей, вибраних з бази моделей для заданих вхідних параметрів. Метод, заснований на фільтрації, дозволяє виділяти інформацію про необхідну частоту, заснований на принципі смугового фільтра. Вибір ширини смуги залежить від інших частот, присутніх в спектрі, і невизначеності в знанні частот дефекту. Пропускна здатність фільтра повинна змінюватися з основною частотою, щоб не включати характерні лінії справного функціонування, що теж змінюються з додаванням швидкості. При збігу спектрів формується інформаційний сигнал щодо наявності виявленої несправності (рис. 2). У разі відсутності в базі моделі відповідного спектра, але наявності невідповідності спектра реального об'єкта та моделі справного стану фіксується факт наявності неідентифікованої несправності.

Для ілюстрації сказаного наведено моделювання пропуску імпульсів включення одного транзистора, яке виникає в результаті порушення роботи системи управління. Ця несправність тільки зменшить функціональні умови приводу без залучення короткого замикання системи захисту. Система приводу може працювати протягом деякого періоду часу, але зі зниженням продуктивності і низькою ефективністю. Проте безперервна робота в такому несправному стані може призвести до катастрофічних руйнувань системи приводу

Висновки. Організація неперервного моніторингу та виявлення несправностей обладнання тягового електропривода на ранніх стадіях розвитку дефектів сприяє мінімізації витрат та порушень процесу перевезень. Запропонована система неперервного контролю та діагностування технічного стану тягового асинхронного електропривода, що базується на порівнянні спектрального складу вхідного струму автономного інвертора тягового електропривода з базою даних його спектрів при несправностях, проста в реалізації, але, слід зазначити, її ефективність знижується при виникненні несправностей, інформації про які немає в базі.

Список використаних джерел

1. Bannasch, M. Smart and flexible train inspection for high speed passenger traffic [Текст] / M. Bannasch, H. Maly, M. Säglitz // Deutsche Bahn AG Forschungs und Technologiezentrum (FTZ). - 2012. - 13 p.
2. Guzinski, J. Application of speed and load torque observers in high speed train [Текст] / J. Guzinski, M. Diguët, Z. Krzeminski, A. Lewicki, H. Abu-Rub // 13 International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC 2008). - Gdansk, Poland. – 2008. - pp. 1405-1412.

3. Bertrand Raison. Détection et localisation de défaillances sur un entraînement électrique [Текст] / These pour obtenir le grade de docteur de l'institut national polytechnique de Grenoble. – 2000. – 214 p.
4. Калінов, А.П., Дослідження режимів роботи асинхронних двигунів з пошкодженнями обмоток статора і ротора та з неякісним кріпленням до основи [Текст] / А.П. Калінов, Д.Г. Мамчур, О.В. Браташ, Ж.І. Ухань // Вісник Кременчуцького держав. політехн. універ. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Вип. 3 (56), Ч.2. – С. 91-94.
5. Thomson, W. T. Industrial application of current signature analysis to diagnose faults in 3-phase squirrel cage induction motors [Текст] / W. T. Thomson, M. Fenger // Pulp and Paper Industry Technical Conference. - 2000. - pp. 205 –211.
6. Черный, А.П. Вейвлет-анализ предаварийных режимов синхронных двигателей для настройки их защит / А.П. Черный, Ю.В. Лашко, И.И. Киба, Е.В. Остапенко // Вісник Кременчуцького держав. політехн. універ. – Кременчук: КДПУ. – 2009. – Вип. 4 (57). – С. 91-94.
7. Ротанов, Н.А. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / Н.А. Ротанов, А.С. Курбасов, Ю.Г. Быков, В.В. Литовченко; Под редакцией Ротанова Н.А. - М.: Транспорт, 1991. - 336 с.
8. Покровский, С.В. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 / Под ред. С.В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.
9. Malhotra, S. Fault diagnosis of induction motor [Текст] / S. Malhotra, M.K.Soni. // Manav Rachna International University, Faridabad, India. 1st Annual International Interdisciplinary Conference АПС. - 2013. – pp. 24-26.
10. Яцько, С.І. Діагностика порушень у роботі тягового електропривода [Текст] / С.І. Яцько, Я.В. Ващенко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. - 2014, вип. 143. – С.195-198.

Яцько Сергій Іванович, Канд. техн. наук, доцент, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Контактний тел.: (057) 730-10-75, E-mail: si_yatsko@mail.ru.

Ващенко Ярослав Васильович, Аспірант, Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту, Український державний університет залізничного транспорту, Контактний тел.: (050) 728-21-92, E-mail: yaroslav_vashchenko@mail.ru.

Стаття постуила 21.05.2015

УДК 629.421

ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБУ РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПОСЛІДОВНОГО ЗБУДЖЕННЯ

**М. І. Шпіка, к.т.н., В. П. Андрійченко, к.т.н.,
В. А. Герасименко, аспірант**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ТЯГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Н. И. Шпика, к.т.н., В. П. Андрейченко, к.т.н.,
В. А. Герасименко, аспирант**

PERFECTION OF METHODS OF REGULATION THE SPEED OF TRACTION MOTORS DC WITH SERIES EXCITATION

**Nicolay Shpika, PhD, Vladimir Andrejchenko, PhD,
Vitalii Gerasymenko, postgraduate**

Розглянуто питання підвищення енергетичної ефективності пристроїв регулювання швидкості тягових електричних двигунів рухомого складу міського електричного

транспорту. Запропонована модернізована схема ослаблення поля з використанням DC/DC перетворювача для тягових двигунів послідовного збудження. Наведено принципову електричну схему пристрою та результати досліджень DC/DC перетворювача.

Ключові слова. Ослаблення поля, DC/DC перетворювач, електрорухомий склад, потужність, регулювання, швидкість, транспорт.

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности устройств регулирования скорости тяговых двигателей подвижного состава городского электрического транспорта. Предложена модернизированная схема ослабления поля с использованием DC/DC преобразователя для тяговых электродвигателей последовательного возбуждения. Приведены принципиальная электрическая схема устройства и результаты исследований DC/DC преобразователя.

Ключевые слова. Ослабление поля, DC/DC преобразователь, электроподвижной состав, мощность, регулирование, скорость, транспорт.

The question of energy efficiency devices control the speed of electric motors of traction rolling stock of public electric transport. Reduce the cost of energy to the movement of vehicles is a promising area of development. The proposed scheme modernized weakening of the field using a DC/DC converter for traction engines successive excitation. To implement the method of the present weakening of the field in the laboratory was manufactured high-frequency converter. Save energy by using the proposed device will be achieved due to the fact that the DC/DC converter transforms the energy with high efficiency, which serial circuits spent on heating resistors, and sends it to power the motor. Shows circuit diagram of the device and the results of research DC/DC converter.

Keywords. Field weakening, DC/DC converter of electric composition, power steering, speed, transport.

1. Вступ.

Як відомо з практики, ціни на енергоносії зростають з темпом до 10% на рік. Це відповідно веде до збільшення енергетичної складової затрат в енергоємних галузях до яких належить і електричний транспорт. У цих умовах перспективним напрямком підвищення ефективності електричного транспорту є розробка та впровадження сучасних пристроїв та технологій, які б сприяли зниженню витрат енергії на рух транспортних засобів.

2. Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями.

На даний час для розширення діапазону регулювання швидкості електричного транспорту з тяговими двигунами послідовного збудження застосовують режим ослаблення поля (ОП) за рахунок зменшення величини магнітного потоку. Розробка та застосування енергозберігаючих пристроїв для регулювання частоти обертання тягових двигунів послідовного збудження є важливою практичною задачею.

3. Аналіз останніх досягнень та публікацій.

Зазвичай регулювання ступенів ОП на електрорухомому складі з тяговими

двигунами послідовного збудження виконується за рахунок активних опорів, які підключаються паралельно послідовній обмотці [1-5] або переключенням обмоток збудження [6-10].

Застосування способу ОП з використанням активного опору має наступні недоліки:

- ступінчастість зміни струму якоря двигуна при виконанні регулювання;
- погана стабільність швидкісних характеристик за рахунок нагрівання та зміни опору резисторів;
- необхідність застосування індуктивного шунта, для уникнення аварійних режимів тягових двигунів при короткочасних відривах струмоприймача від контактного проводу;
- втрати потужності в шунтуючих опорах.

Застосування способу ОП з переключенням обмоток збудження призводить до ускладнення конструкції тягових двигунів.

4. Визначення цілей та задач дослідження.

Завданням роботи є отримання математичних залежностей між параметрами

високочастотного перетворювача та коефіцієнтом регулювання збудження тягового двигуна.

5. Основна частина досліджень.

На підставі аналізу способів ОП було визначено напрям удосконалення регулювання частоти обертання ТЕД послідовного збудження з використанням DC/DC перетворювача [3]. Запропонований спосіб ОП з використанням DC/DC перетворювача представлений на рис. 1.

Принцип дії схеми полягає в тому, що за допомогою вхідного кола DC/DC перетворювача виконується шунтування

послідовної обмотки збудження при включенні контактора Коп. Вихід перетворювача включений паралельно з живлячою мережею через розділовий діод.

Економія енергії при використанні запропонованого пристрою досягається за рахунок того, що DC/DC перетворювач трансформує енергію з високим коефіцієнтом корисної дії, яка в серійних схемах витрачалася на нагрів резисторів, і направляє її для живлення ТЕД.

Плавність і міра ОП досягається за рахунок зміни коефіцієнта заповнення перетворювача за певним законом в залежності від параметрів тягового двигуна.

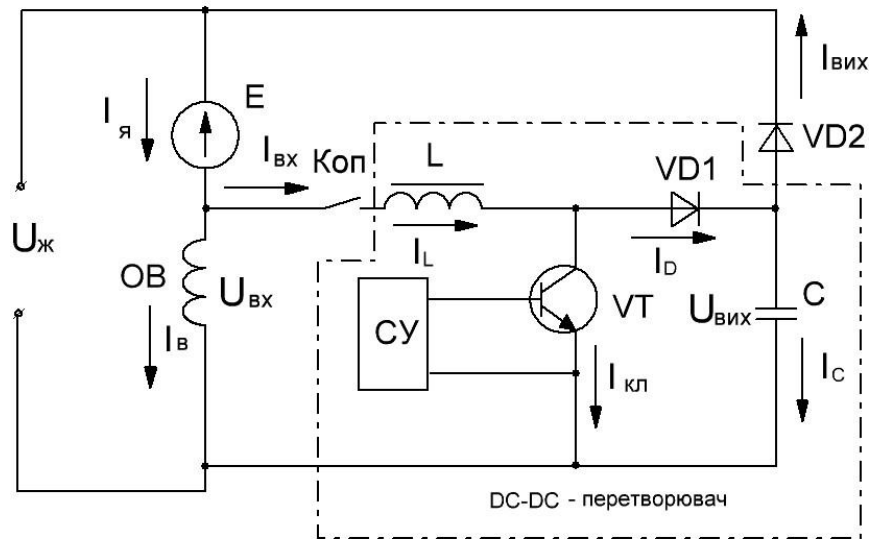


Рис. 1 – Принципова електрична схема ослаблення поля з використанням високочастотного перетворювача

Знайдемо залежність між параметрами високочастотного перетворювача та коефіцієнтом регулювання збудження тягового двигуна.

Рівняння для регулювальної характеристики підвищуючого без трансформаторного DC/DC перетворювача має наступний вигляд

$$U_{вих} = \frac{U_{вх}}{(1 - \gamma)}, \quad (1)$$

де: $U_{вих}$ – вихідна напруга DC/DC перетворювача, яка в прийнятій схемі дорівнює напрузі контактної мережі;

$U_{вх}$ – вхідна напруга перетворювача, яка відповідає падінню напруги на обмотці послідовного збудження тягового електродвигуна.

Знайдемо співвідношення між параметрами запропонованої схеми і відповідно до закону збереження енергії можна записати наступне рівняння для вхідних і вихідних кіл перетворювача

$$I_{вх} \cdot U_{вх} = I_{вих} \cdot U_{вих} \cdot K_{DC}, \quad (2)$$

де: $I_{вх}$, $I_{вих}$ – відповідно до схеми вхідний і вихідний струм DC/DC перетворювача;

K_{DC} – коефіцієнт корисної дії перетворювача.

Підставимо у вираз (2) значення вихідної напруги перетворювача

$$I_{ex} \cdot U_{ex} = I_{вих} \frac{U_{ex}}{1-\gamma} K_{DC} \quad (3)$$

Відповідно до схеми пристрою, яка представлена на рис. 1, вихідний струм буде дорівнювати:

$$I_{вих} = I_{ex} \frac{(1-\gamma)}{K_{DC}} \quad (4)$$

У виразі (4) можна замінити $I_{вих} = I_{я} - I_{в}$:

$$I_{вих} = (I_{я} - I_{в}) \frac{(1-\gamma)}{K_{DC}} \quad (5)$$

Розділивши вираз (5) на струм якоря ТЕД, отримаємо

$$\frac{I_{в}}{I_{я}} (1-\gamma) = (1-\gamma) - \frac{I_{вих} \cdot K_{DC}}{I_{я}} \quad (6)$$

Оскільки відношення $I_{в}/I_{я} = \alpha$, то:

$$\alpha = \frac{(1-\gamma) - \frac{I_{вих} \cdot K_{DC}}{I_{я}}}{1-\gamma} \quad (7)$$

Позначивши відношення $I_{вих}/I_{я} = K_{кн}$ остаточно отримаємо вираз для коефіцієнта регулювання збудження:

$$\alpha = \frac{(1-\gamma) - K_{кн} \cdot K_{DC}}{1-\gamma} \quad (8)$$

де $I_{вих}/I_{я} = K_{кн}$ – коефіцієнт навантаження пристрою.

Відповідно до виразу (8) побудовані дії перетворювача KDC при розрахунках був залежності зміни коефіцієнта регулювання збудження α від коефіцієнта заповнення імпульсного переривника γ . Значення коефіцієнт навантаження $K_{кн}$ змінювалось в діапазоні від 0,1 до 0,5. Коефіцієнт корисної дії перетворювача KDC при розрахунках був незмінним та дорівнював 0,9. Залежності (α) f (γ) при різних значеннях коефіцієнта навантаження $K_{кн}$ представлені на рис. 2.

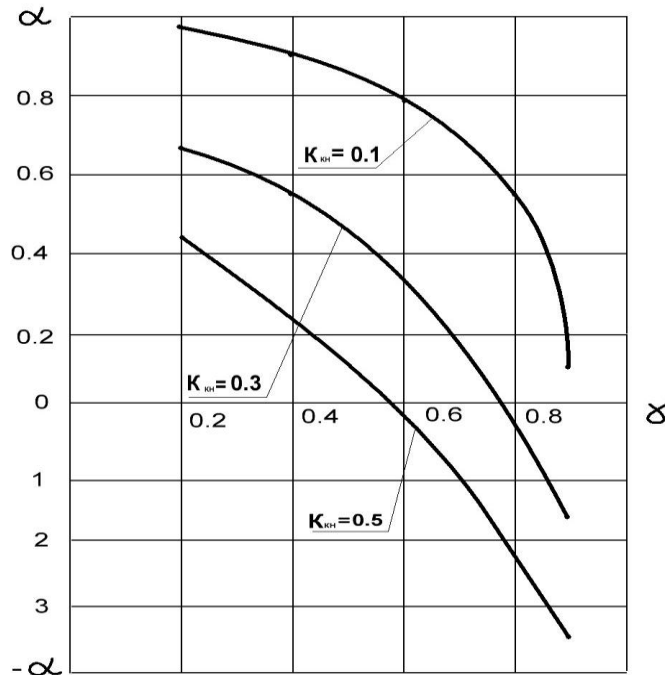


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта регулювання збудження α від коефіцієнта заповнення γ DC/DC перетворювача

Для реалізації представленого способу ослаблення поля в лабораторних умовах був виготовлений

перетворювач, принципова схема якого показана на рис.3.

високочастотний

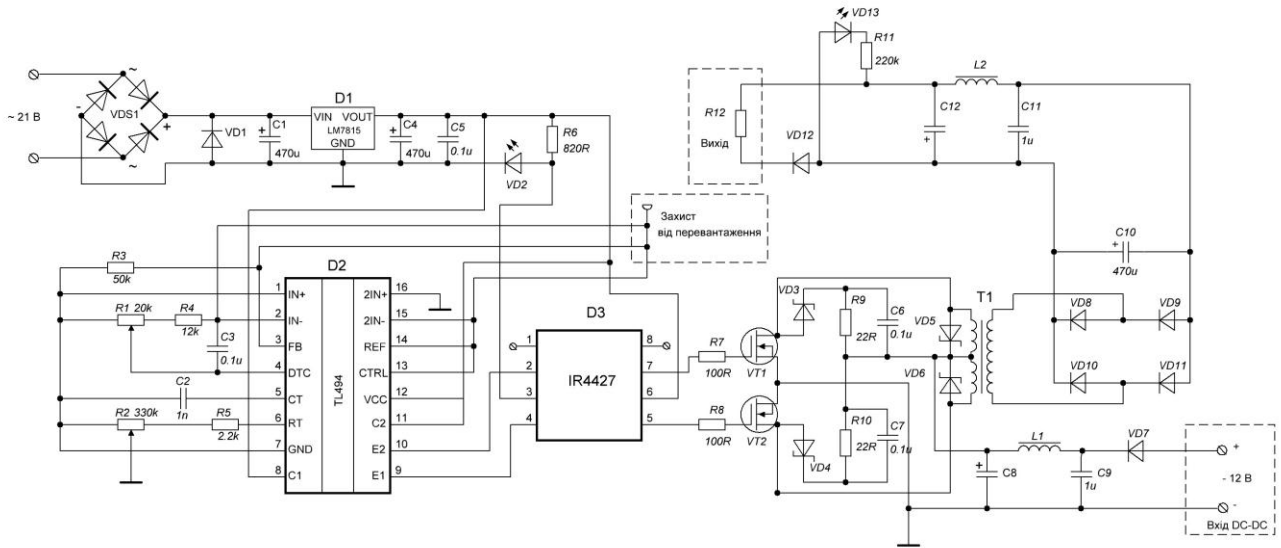


Рис. 3 –Принципова схема високочастотного DC/DC перетворювача

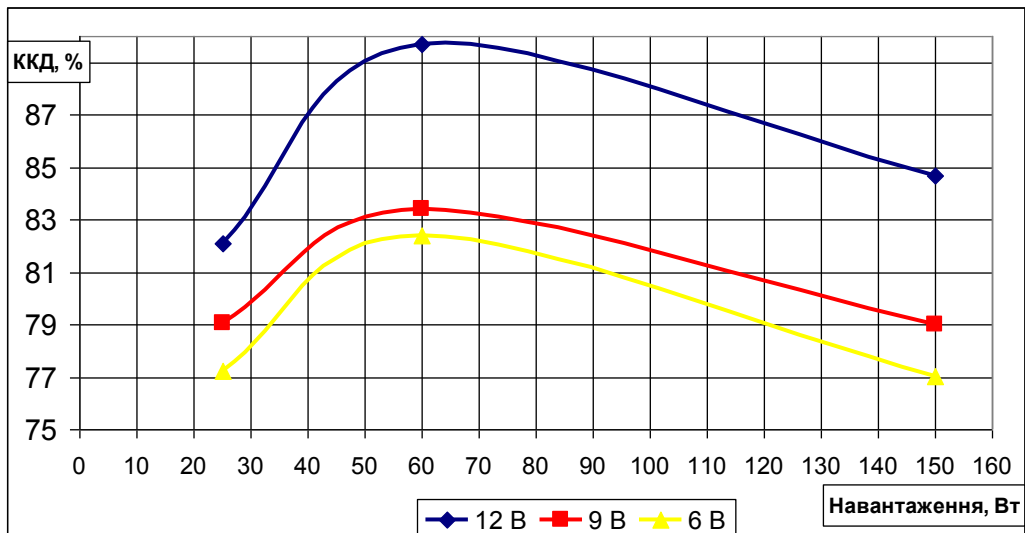


Рис. 4 – Залежність ККД перетворювача від потужності навантаження

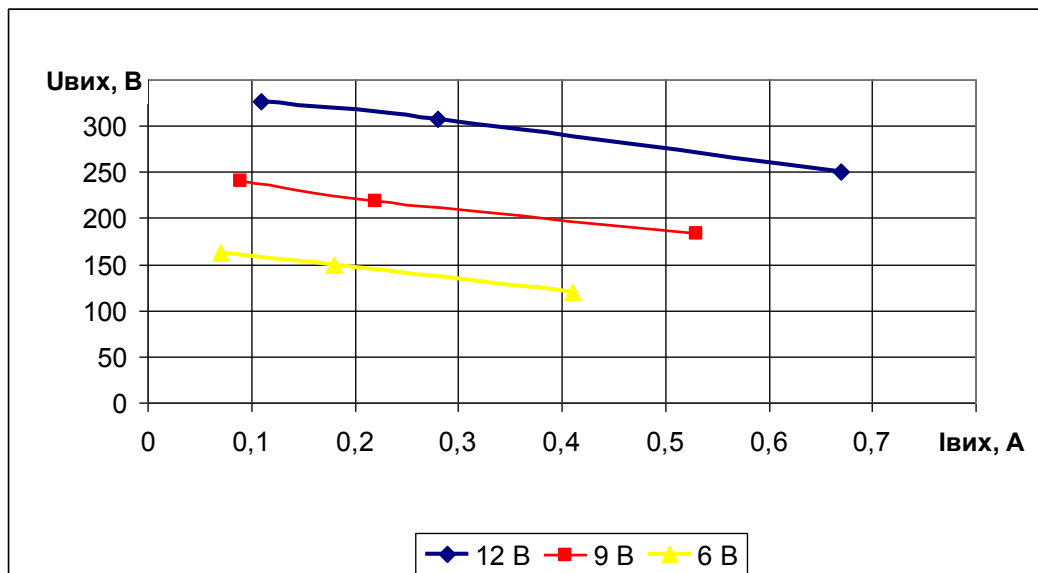


Рис. 5 – Залежність вихідної напруги перетворювача від струму навантаження

6. Виводи з досліджень та перспективи, подальший розвиток в даному напрямку.

З аналізу рис. 2 впливають наступні зауваження:

а) не лінійність залежності (α) та (γ) збільшується при зменшенні коефіцієнта навантаження $K_{кн}$;

б) при значеннях коефіцієнта навантаження $K_{кн}$ більших за 0.1, та коефіцієнта заповнення імпульсного

переривника γ більших за 0.5 коефіцієнт регулювання збудження α має негативні значення, що свідчить про непрацездатність запропонованого пристрою при даних режимах;

в) при розробці системи керування запропонованим пристроєм з широким діапазоном зміни коефіцієнта регулювання збудження α необхідно щоб значення коефіцієнта навантаження $K_{кн}$ не перевищувало 0.1.

Література

1. Єфремов, И. С. Теория и расчет троллейбуса: Электрическое оборудование [Текст] / И. С. Єфремов, Г. Е. Косарев. – М.: Высш. шк., 1981. – 248 с.
2. Ротанов, Н. А. Проектирование систем управления электроподвижным составом [Текст] / Н. А. Ротанов, Д. Д. Захарченко и др.; Под ред. Н. А. Ротанова. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
3. Корягина, Е. Е. Электрооборудование трамваев и троллейбусов [Текст] / Е. Е. Корягина, О. А. Коськин. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
4. Гаврилов, Я. И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями [Текст] / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацаканов. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.
5. Мелешин, В. И. Транзисторная преобразовательная техника [Текст] / В. И. Мелешин. – Москва: Техносфера, 2005. – 632 с.
6. Jitaru I.D. DC-DC Converter Technologies, APEC'96, Professional Education Seminar Workbook.
7. Korotkov S., Meleshin V., Nemchinov A., Fraidlin S. Small-Signal Modeling of Soft-Switched Asymmetrical Half Bridge DC/DC Converter. APEC'95, 1995.
8. Meleshin V., Yakushev V., Fraidlin S. Full-Bridge Isolated Current Fed Converter. APEC, 2000.
9. Патент № 2471652 Российская Федерация, МПК (2006.01) B60L15/08 Способ ослабления возбуждения тяговых электродвигателей локомотива [Текст] / В. Ф. Руденко, М. А. Егоров, Д. С. Спиридонов; заявитель и правообладатель Открытое

Автоматизовані системи електричного транспорту

акционерное общество «Российские железные дороги». – № 2471652, заявл. 20.07.2011; опубл. 10.01.2013.

10. Wittenbreder E.H. High Efficiency Coupled Inductor Soft Switching Power Converters. Патент США. №6272023B1. 2001.

Андрейченко Владимир Павлович, Кандидат технических наук, доцент, Доцент кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (066) 254 25 10, E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

Шпика Николай Иванович, Кандидат технических наук, доцент, Доцент кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Герасименко Виталий Анатольевич, Аспирант кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (099) 388 30 28, E-mail: twixvi@yandex.ua

Андрійченко Володимир Павлович, Кандидат технічних наук, доцент, Доцент кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (066) 254 25 10, E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

Шпіка Микола Іванович, Кандидат технічних наук, доцент, Доцент кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Герасименко Віталій Анатолійович, Аспірант кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (099) 388 30 28, E-mail: twixvi@yandex.ua

Vladimir Andreychenko, Professor, Professor of the Department of Electrical Transport, Department of electric transport, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Revolution, 12, Kharkiv, Ukraine, 61002, Contact tel.: 066-254-25-10, E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

Shpika Nicolay, Professor, Professor of the Department of Electrical Transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, Contact tel.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Gerasymenko Vitalii, Postgraduate in electrical transport, Kharkiv National University of urban im.A.N.Beketova, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, Contact tel.: (099) 388 30 28, E-mail: twixvi@yandex.ua

Стаття постуила 21.04.2015

УДК 629.421; 629.405

ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАМВАЙНОГО ВАГОНУ

М.І. Шпіка, к. т. н., В.П. Андрійченко, к. т. н., А.І. Бесараб, інженер

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАМВАЙНОГО ВАГОНА

Н.И. Шпика, к. т. н., В.П. Андрейченко, к. т. н., А.И. Бесараб, инженер
IMPROVEMENT OF TECHNICAL EFFICIENCY AND POWER INDEXES OF SYSTEM OF HAULING ELECTROMECHANIC OF SURFACE-CAR

Shpika Nicolay, PhD, Andrejchenko Vladimir, PhD, Besarab Andrey, engineer

В статті виконано аналіз систем тягового електроприводу трамвайних вагонів, що експлуатуються. Запропонована нова структура та алгоритми керування системи

тягового електроприводу з імпульсними перетворювачами. Приведено порівняльні характеристики систем тягового електроприводу з точки зору технічних та енергетичних показників.

Ключові слова. Система тягового електроприводу, імпульсний перетворювач, тяговий електродвигун, трамвайний вагон, технічна ефективність, енергетичні показники.

В статье выполнен анализ систем тягового электропривода трамвайных вагонов, которые эксплуатируются. Предложена новая структура и алгоритмы управления системы тягового электропривода с импульсными преобразователями. Приведены сравнительные характеристики систем тягового электропривода с точки зрения технических и энергетических показателей.

Ключевые слова. Система тягового электропривода, импульсный преобразователь, тяговый электродвигатель, трамвайный вагон, техническая эффективность, энергетические показатели.

The analysis of the systems of hauling electromechanic of surface-cars that is exploited is executed in the article. A new structure and algorithms of management of the system of hauling electromechanic offer with impulsive transformers. Comparative characteristics of the traction electric drive systems in terms of technical and energy performance. In the improved system of electric traction significantly increased the level of technical efficiency imported electrical equipment type "TV Progress" company ALSTOM. In addition, the proposed system of electric traction has better energy performance than the imported one. This system meets modern requirements and reduces operating costs. Such a system of electric traction can be used for modernization of tramcars T3.

Keywords. System of hauling electromechanic, impulsive transformer, hauling electric motor, surface-car, technical efficiency, power indexes.

1. Вступ

Забезпечення конкурентної спроможності міського електричного транспорту з другими видами міського транспорту пов'язано з впровадженням електрорухомого складу, що відповідає сучасним вимогам, та одночасним зниженням експлуатаційних затрат.

2. Постановка проблеми в загальному виді та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями

Серед основних технічних вимог, які пред'являються до сучасного рухомого складу міського електричного транспорту, таких як підвищення провізної спроможності, забезпечення комфортних умов для пасажирів, важливе значення набули зниження енергетичних затрат та підвищення технічної ефективності. Нині діючий електрорухомий склад в більшості своїй не відповідає цим вимогам, морально та фізично застарів, в значній мірі зношений.

В цій роботі проведено аналіз систем тягового електроприводу трамвайних

вагонів, що експлуатуються в різних містах України, з точки зору енергозбереження, надійності роботи та затрат на обслуговування з метою покращення цих показників за рахунок удосконалення структури та алгоритмів керування.

3. Аналіз останніх досягнень та публікацій

Питанням вдосконалення систем тягового електроприводу міського електротранспорту приділялась значна увага, що відображалось в ряді робіт, серед яких слід відмітити [1-5].

В [1,2] пропонувалось для покращення енергетичних показників систем тягового електроприводу тролейбусів та трамвайних вагонів впроваджувати замість електромеханічних контролерів з пусковими реостатами імпульсні перетворювачі вітчизняного виробництва.

В [3] вирішувалось питання енергозбереження в системі тягового електроприводу метрополітену.

В [4,5] показано покращення енергетичних показників систем тягового

електроприводу тролейбусів та трамвайних вагонів в деяких містах України до 35% за рахунок впровадження електричного обладнання типу “TV Progress” на базі імпульсного перетворювача фірми ALSTOM.

4. Визначення мети та задачі досліджень

Метою роботи є вдосконалення структури та алгоритмів керування системи тягового електроприводу трамвайного вагону з імпульсними перетворювачами для покращення технічних та енергетичних показників.

5. Основна частина досліджень

На сьогоднішній день на трамвайних вагонах, що експлуатуються, використовуються в основному три види систем тягових електроприводів з тяговими електродвигунами постійного струму послідовного збудження, які відрізняються пристроями живлення електродвигунів.

В перших живленнях тягових електродвигунів відбувається через електромеханічний контролер з пусковими реостатами, як, наприклад, в трамвайних вагонах ТЗ чеського виробництва [6]. До недоліків такої системи слід віднести не тільки низькі енергетичні показники, за рахунок пускових резисторів, та наявність значної кількості контактної апаратури, що знижує надійність схеми та потребує великих експлуатаційних затрат. Ця схема має ще один суттєвий недолік – живлення обох груп електродвигунів забезпечується одним електромеханічним контролером, вихід з ладу якого унеможлиблює рух

трамвайного вагону. У зв'язку з суттєвими втратами енергії в пускових реостатах та значними експлуатаційними затратами, такі вагони в даний час потребують негайної модернізації.

В електроприводах другого виду контролер з пусковими реостатами замінений на імпульсний перетворювач постійного струму, в якому постійна напруга мережі живлення перетворюється в імпульсну, що дозволяє плавно регулювати струм і відповідно момент тягових електродвигунів. Використання імпульсного перетворювача суттєво підвищило ККД електроприводу. Електроприводи другого виду використовуються на трамвайних вагонах ТЗМ чеського виробництва [7].

До їх недоліків слід віднести наявність контактної апаратури, що знижує надійність схеми, послідовне включення кількох силових напівпровідникових приборів, що погіршує енергетичні показники системи електроприводу, ступінчате ослаблення поля тягових електродвигунів, застаріла елементна база та відсутність резервування в імпульсних перетворювачах.

В електроприводах третього виду [8] використовується імпортоване електричне обладнання типу “TV Progress” фірми ALSTOM. Структурно силова схема електроприводу складається з двох груп тягових електродвигунів М1,М2 та М3,М4, які підключені до двох індивідуальних контейнерів з імпульсними перетворювачами (рис. 1).

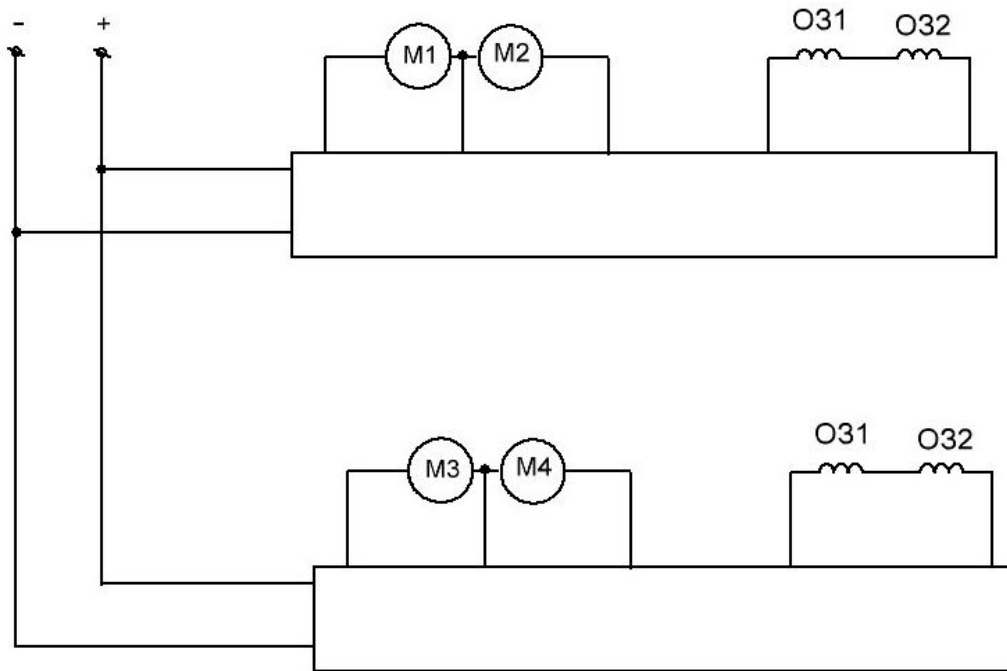


Рис. 1– Силова схема трамвайного вагону Т3 з електричним обладнанням типу “TV Progress”

В кожному контейнері розміщені тяговий та резервний імпульсні перетворювачі, спрощена схема яких приведена на рис. 2. Тяговий перетворювач забезпечує реверс напрямку обертання електродвигунів та регулювання струмів якоря і збудження, а резервний – обмеження напруги живлення тягового перетворювача та струму короткого замкнення в режимі тяги, а також обмеження напруги на вхідному фільтрі при рекуперації енергії в

мережу. Таке технічне рішення має переваги перед попередніми.

В той же час значна кількість послідовно з'єднаних силових напівпровідникових приборів, що працюють постійно в кожній групі електродвигунів в тяговому режимі, суттєво знижує енергетичні показники та надійність системи тягового електроприводу [9, 10]. Крім того, необхідні значні фінансові затрати в валюті на закупку такого обладнання.

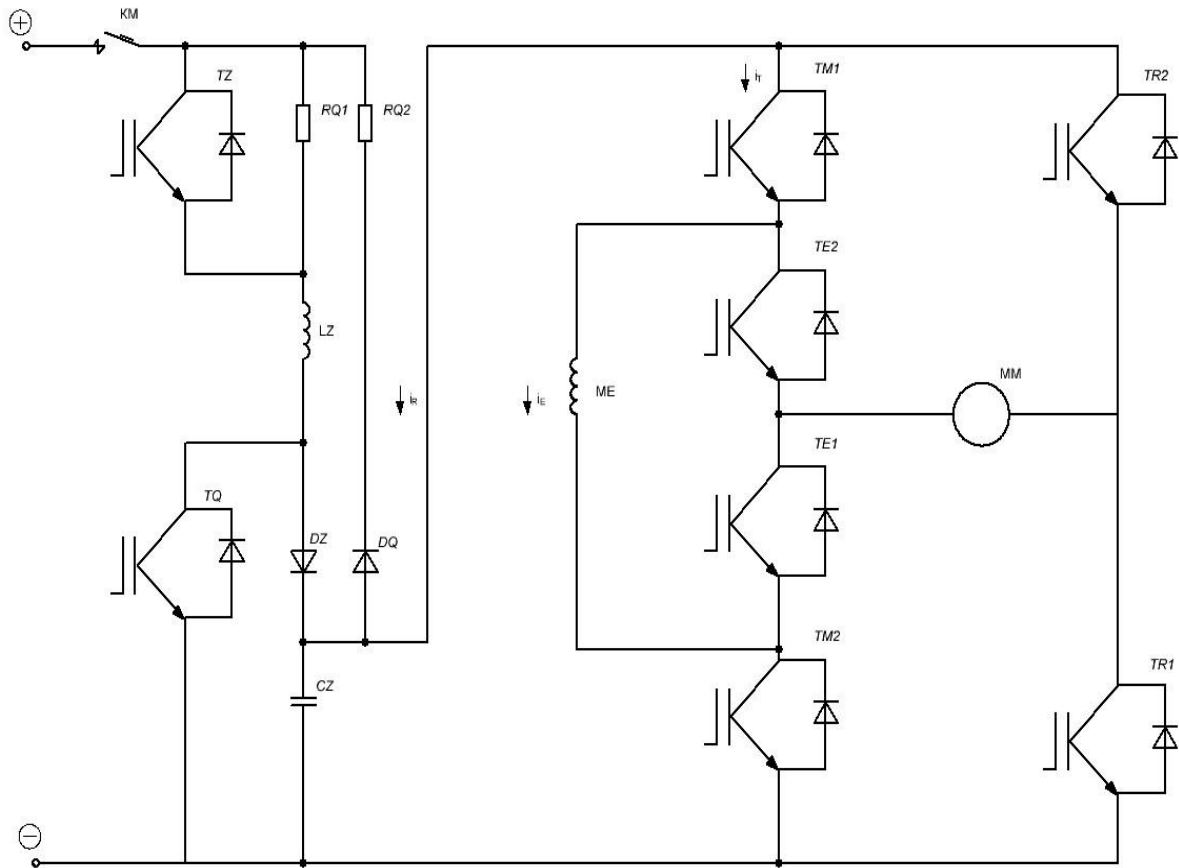


Рис.2 – Спрощена схема тягового та резервного імпульсних перетворювачів фірми ALSTOM

Тому розроблена нова силова схема тягового електроприводу з вдосконаленою структурою, яка приведена на рис. 3.

Нововведенням такої схеми є те, що запропонована нова структура системи керування тяговими електродвигунами послідовного збудження і алгоритми керування. Імпульсний перетворювач забезпечує регулювання величини струму тягових електродвигунів на заданому рівні, реверс напрямку руху трамвайного вагону без використання контактної апаратури, плавне

ослаблення поля тягових електродвигунів, обмеження напруги на тягових електродвигунах на рівні номінальної, електричне реостатне гальмування транспортного засобу, а також має резервне обладнання, для забезпечення роботи електроприводу при відмові основного. При цьому використовується значно менше напівпровідникових елементів ніж в обладнанні "TV Progress".

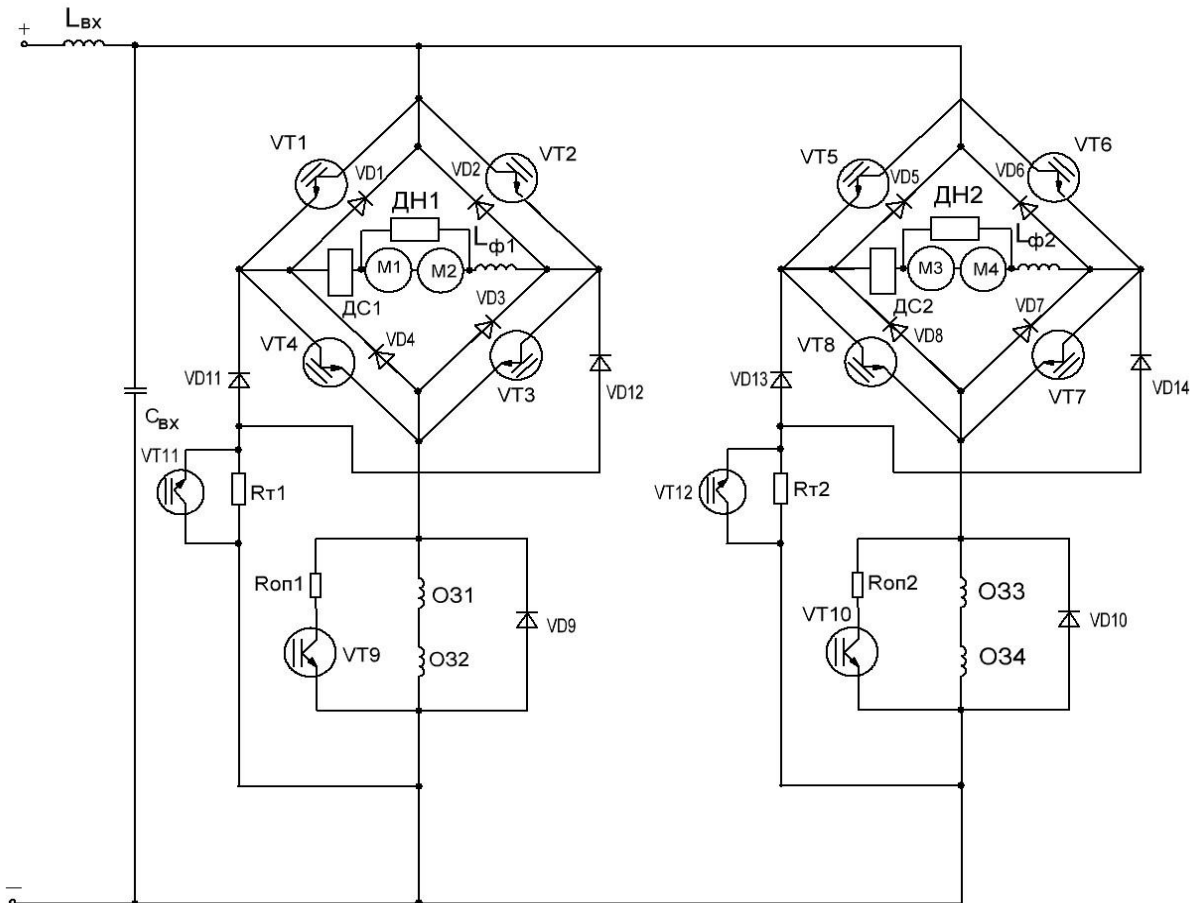


Рис.3 – Вдосконалена силова схема тягового електроприводу

Для забезпечення реверсу напрямку руху трамвайного вагону без використання контактної апаратури імпульсні перетворювачі виконані по схемі однофазного транзисторного мосту зі зворотними діодами. В діагональ кожного мосту включені послідовно з'єднані два якоря електродвигунів з індивідуальним датчиком струму, якоря електродвигунів зашунтовані датчиками напруги.

В режимі тяги працюють попарно два транзистори, причому, наприклад, транзистори VT2 і VT6 виконують функції ключів, а транзистори VT4 і VT8 працюють в режимі широтно-імпульсної модуляції, забезпечуючи протікання заданого по величині струму через обмотки електродвигунів до виходу їх на природну характеристику. Для ослаблення поля електродвигунів

вступають в режим широтно-імпульсної модуляції транзистори VT9 і VT10.

Якщо напруга мережі живлення перевищує номінальне значення, то робота транзисторів VT4 і VT8 в режимі широтно-імпульсної модуляції продовжується, що обмежує середнє значення напруги на якорях електродвигунів на рівні номінальної, і починають працювати в режимі широтно-імпульсної модуляції транзистори VT9 і VT10.

Режим електричного гальмування забезпечується транзисторами VT11 і VT12, які працюють в режимі широтно-імпульсної модуляції, а також транзисторами VT3 і VT7, які виконують функції ключів.

В разі відмови транзистора VT4 або VT8, наприклад його пробоем, транзистор VT2 або VT6 автоматично переводиться в режим широтно-імпульсної модуляції для регулювання величини струму тягових електродвигунів з видачею відповідного сигналу про відмову.

Запропонована система тягового електроприводу має кращі енергетичні показники ніж у імпортного електричного

Автоматизовані системи електричного транспорту

обладнання типу “TV Progress” фірми ALSTOM. На рис.4 показано втрати потужності в імпульсному перетворювачі в пусковому режимі при використанні різних системах тягового електроприводу.

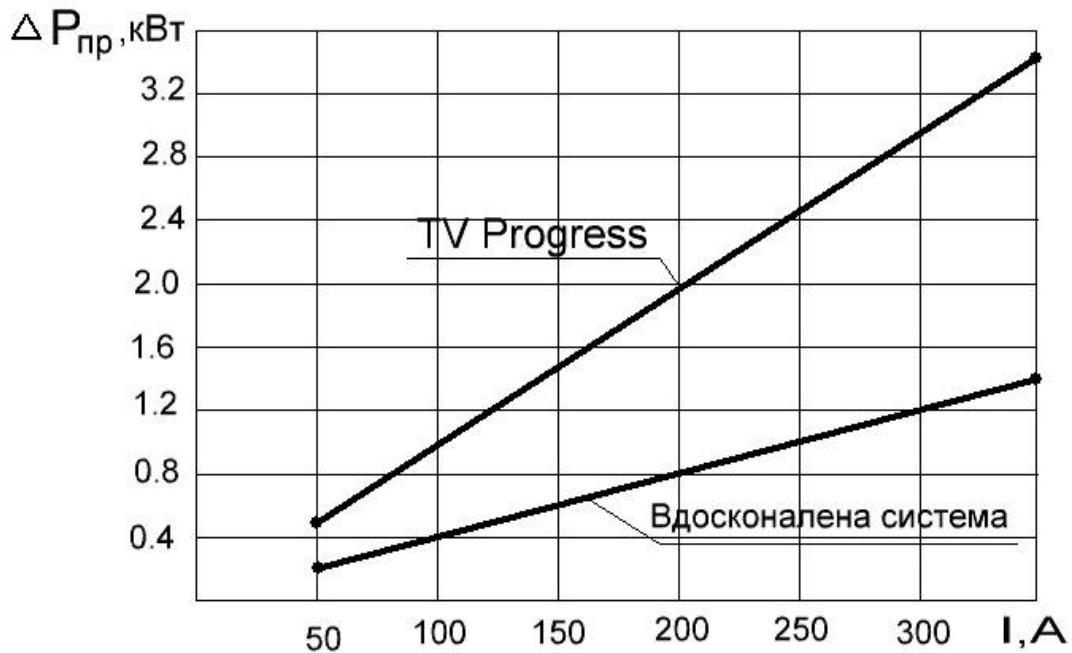


Рис. 4 – Втрати потужності при різних системах тягового електроприводу

Економія електроенергії при використанні вдосконаленої системи тягового електроприводу за зміну дорівнює:

$$A_{\text{пр}} = (\Delta P_{\text{пр1}} - \Delta P_{\text{пр2}}) \times t, \quad (1)$$

де: $\Delta P_{\text{пр1}}$ – втрати потужності в імпульсному перетворювачі в пусковому режимі при використанні електричного обладнання типу “TV Progress” фірми ALSTOM;

$\Delta P_{\text{пр2}}$ – втрати потужності в імпульсному перетворювачі в пусковому режимі при використанні вдосконаленої системи тягового електроприводу;

t – час роботи імпульсного тягового електроприводу на перетворювача в пусковому електрорухомому складі з двох вагонів за рік режимі за зміну. дорівнює:

Економія електроенергії при використанні вдосконаленої системи

$$A_{\Sigma} = A_{\text{пр}} \times n \times m, \quad (2)$$

де: n – кількість імпульсних перетворювачів на електрорухомому складі;

m – кількість робочих днів за рік.

Якщо прийняти, що $t = 5$ годин, $n = 4$, $m = 350$ днів, то економія електроенергії при використанні вдосконаленої системи складе 8400 кВт год.

6. Висновки з досліджень та перспективи, подальший розвиток в даному напрямку

У порівнянні з системою тягового електроприводу трамвайного вагону ТЗМ, у вдосконаленій системі суттєво підвищена технічна ефективність до рівня імпортного електричного обладнання типу “TV Progress” фірми ALSTOM.

В той же час вдосконалена система тягового електроприводу має кращі енергетичні показники ніж у імпортного

електричного обладнання типу “TV Progress”
фірми ALSTOM.

Тому така система тягового
електроприводу може бути використана для
модернізації трамвайних вагонів ТЗ.

Список літератури

1. Забарский Л.В. и др. Результаты испытаний опытных образцов тиристорных регуляторов типа РТ 300/700 на подвижном составе. // Наука и техника в городском хозяйстве. – №33 – К.: Будівельник. – 1976 – С.13-19.
2. Шпика Н.И., Донец А.В. К вопросу модернизации тяговых электроприводов городского электротранспорта. Коммунальное хозяйство городов/ Научно-технический сборник. – Выпуск 76. – Серия: технические науки и архитектура. – Киев: “Техніка”. – 2007. – с. 354-359.
3. Хворост Н.В. Анализ расхода электроэнергии и энергосбережение на Харьковском метрополитене / Н.В. Хворост, В.И. Ляхов, М.В. Ляхов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті –2005. –№4. – С. 87–90.
4. Черны М., Качимов В. Внедрение энергоэффективного оборудования и технологий на подвижном составе городского электротранспорта Украины. Коммунальное хозяйство городов/ Научно-технический сборник.- Выпуск 88.- Серия: технические науки. – Киев. – “Техніка”. – 2009. – С. 354-359
5. Черны М., Качимов В. Внедрение энергоэффективного оборудования и технологий на подвижном составе городского электротранспорта Украины.// Сталий розвиток міст. Електричний транспорт – перспективи розвитку та кадрове забезпечення: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Харків: ХНАМГ. – 2009. – С. 58-59.
6. Корягина Е.Е., Коськин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов. Учебник для техникумов городского транспорта. – М.: Транспорт, 1982. – 296 с.
7. Электрооборудование трамвайного вагона Т6В5 (ТЗМ). Издатель:ЧКД Прага,1982, 310с.
8. Электрическое оборудование «ALSTOM TV PROGRESS» для транспортных средств. Каталог продукции – Прага: ALSTOM Industry, 2006. – 24 с.
9. Korotkov S., Meleshin V., Nemchinov A., Fraidlin S. Small-Signal Modeling of Soft-Switched Asymmetrical Half Bridge DC/DC Converter. APEC'95, 1995.
10. Meleshin V., Yakushev V., Fraidlin S. Full-Bridge Isolated Current Fed Converter. APEC, 2000.

Шпика Николай Иванович, Кандидат технических наук, доцент, Доцент кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Андрейченко Владимир Павлович, Кандидат технических наук, доцент, Доцент кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (066) 254 25 10, E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

Бесараб Андрей Иванович, Инженер, старший преподаватель кафедры Электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им.А.Н.Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, Контактный тел.: (057) 706 15 36

Шпика Микола Іванович, Кандидат технічних наук, доцент, Доцент кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (057) 707 33 15, E-mail: niset53@yandex.ru

Андрійченко Володимир Павлович, Кандидат технічних наук, доцент, Доцент кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (066) 254 25 10, E-mail: andreychenko-vp@mail.ru

Бесараб Андрій Іванович, Інженер, старший викладач кафедри Електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, Контактний тел.: (057) 706 15 36

Shpika Nicolay, Professor, Professor of the Department of Electrical Transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002

Contact tel.: (057) 707 33 15

E-mail: niset53@yandex.ru

Andrejchenko Vladimir, Professor, Professor of the Department of Electrical Transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, Contact tel.: (066) 254 25 10, E-mail: andrejchenko-vp@mail.ru

Besarab Andrey, Engineer, a senior lecturer in electrical transport, Kharkiv National University of urban im.A.N.Beketova, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, Contact tel.: (057) 706 15 36

Стаття поступила 20.05.2015

УДК 621.314

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ШИРОТНО – ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Канд. техн. наук Е.Я. Ивакина

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД ВИХІДНОЇ НАПРУГИ ВИПРЯМЛЯЧА З ШИРОТНО - ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ

Канд. техн. наук К.Я. Івакіна

THE HARMONIC COMPOSITION OF THE OUTPUT VOLTAGE OF THE RECTIFIER WITH LATITUDINAL-IMPULSIVE MODULATION

Cand. of techn. sciences K.Y. Ivakina

В статье выполнен анализ гармонического состава выходного напряжения выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией. Получено выражение для комплексной величины q -й гармоники. Приведено графическое отображение

q -й гармоники выходного напряжения вольтодобавочного преобразователя на комплексной плоскости, что позволяет наглядно иллюстрировать процесс их образования.

Ключевые слова. *Выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, гармонический состав, вольтодобавочный преобразователь, векторная диаграмма.*

У статті виконано аналіз гармонійного складу вихідної напруги випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією. Отримано вираз для комплексної величини q -й гармоніки. Наведено графічне відображення q -й гармоніки вихідної напруги вольтододатного перетворювача на комплексній площині, що дозволяє наочно ілюструвати процес їх утворення.

Ключові слова. *Випрямляч, широтно-імпульсна модуляція, гармонійний склад, вольтододатний перетворювач, векторна діаграма.*

In the article the analysis of harmonic composition of the output voltage of the rectifier with latitudinal-impulsive modulation , is executed. The analysis of harmonic composition is executed for the system of automatic control of output tension of rectifier with an integral regulator. The expression for the complex quantity q - th harmonic obtained. The graphic image of q -th harmonic of the output voltage of the rectifier with latitudinal-impulsive modulation in the complex plane submitted. This graphic image illustrates the process of their education.

Keywords. *Rectifier, latitudinal-impulsive modulation, harmonic composition, booster converter, vector diagram.*

1. Вступление. Улучшение качества электрической энергии на выходе мощной системы питания, которая построена на базе выпрямителя, связано с оптимизацией гармонического состава выходного напряжения. Известна эффективность применения для этой цели замкнутых систем автоматического регулирования.

2. Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Повышение качества электрической энергии на выходе полупроводниковых преобразователей путем применения замкнутых систем автоматического регулирования является актуальной задачей. Данная проблема непосредственно связана с улучшением электромагнитной совместимости тяговых подстанций постоянного тока с контактной сетью. Применение в выпрямителе широтно-импульсной модуляции для регулирования среднего значения выходного напряжения одновременно с расширением полосы пропускания изменяет природу генерации гармоник по сравнению с фазовым регулированием. В связи с этим возникает необходимость исследования процесса генерации гармонических составляющих в выходное напряжение выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией.

3. Анализ последних достижений и публикаций. В работах [1, 2] приведены результаты исследований выпрямителей с широтно - импульсной модуляцией. Однако данные исследования имеют ограниченный характер, заключающийся в рассмотрении их основных энергетических показателей.

4. Цель и задачи исследований. Задачей исследований является определения особенностей влияния широтно – импульсной модуляции на формирования гармонического состава выходного напряжения выпрямителя. Целью исследований – получение аналитических

зависимостей, определяющих гармонический состав выходного напряжения выпрямителя с широтно – импульсной модуляцией при симметрии питающих напряжений.

5. Основная часть исследований.

Полоса пропускания шести и двенадцатипульсного тиристорных выпрямителей, которые широко применяют для построения мощных стабилизированных систем питания, во многих случаях является недостаточной. Использование в выпрямителе полностью управляемых силовых ключей позволяет вместо фазового управления применить широтно- импульсное регулирование выходного напряжения [1, 3, 4]. Применение современных силовых ключей позволяет реализовать в выпрямителе с достаточно малыми потерями широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) в несколько килогерц [5]. Это позволяет значительно расширить его полосу пропускания.

При рассмотрении гармонического состава выходного напряжения выпрямителя с ШИМ приняты допущения о симметрии питающей сети, идеальности системы управления и силовых ключей.

Выходное напряжение выпрямителя с ШИМ (см. рис. 1) представляет собой последовательность импульсов длительностью θ_γ , ограниченных сверху линейными напряжениями выпрямителя. В [6] показано, что данная импульсная последовательность может быть, с достаточно высокой степенью точности, аппроксимирована последовательностью прямоугольных импульсов с амплитудами

$$U_u(\theta_{nT_2}) = U_m \sin \left[\frac{2\pi}{m} - (n-1) \frac{2\pi}{K_o m} + \gamma \frac{\pi}{K_o m} \right] = U_m \sin \left\{ \frac{\pi}{K_o m} [2(1-n + K_o) + \gamma] \right\} \quad (1)$$

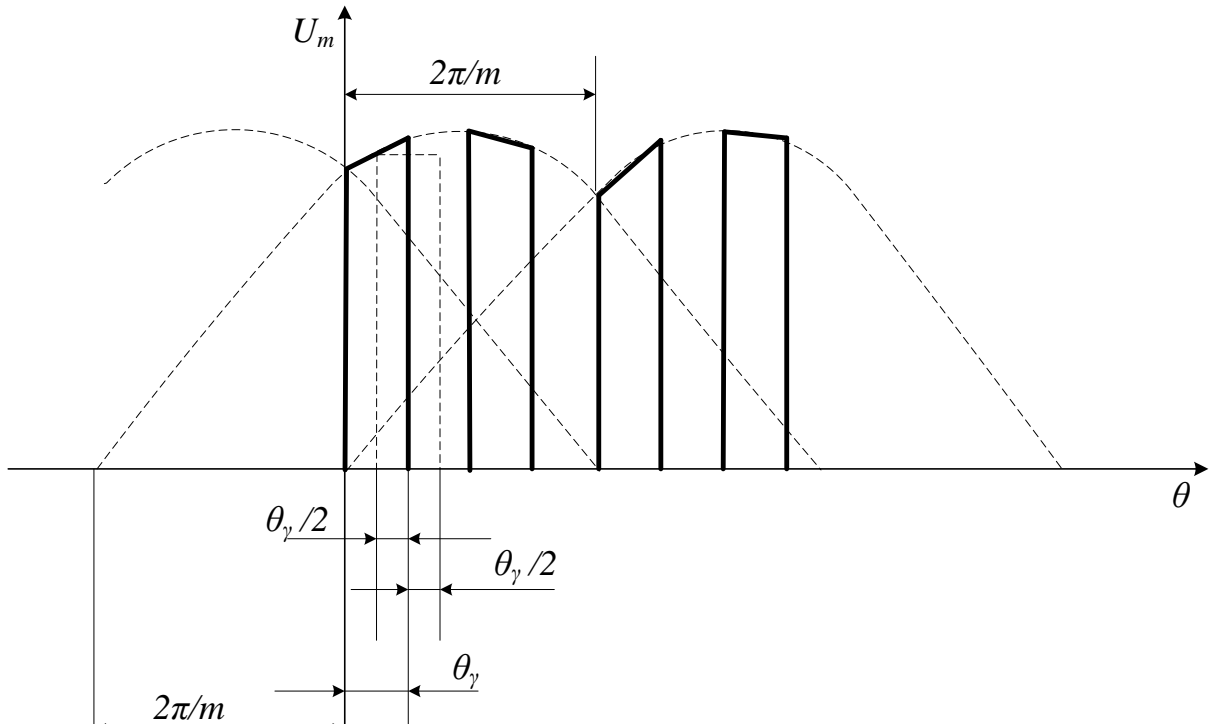


Рис. 1- Выходное напряжения выпрямителя с ШИМ

Комплексную величину q -й гармоники определим разложением в ряд Фурье импульсной последовательности (1)

$$\dot{U}_q = \frac{m}{\pi} \sum_{n=1}^{K_o} \int_{-\gamma \frac{\pi}{K_o m} + \varphi_n + \frac{2\pi}{K_o m} (n-1)}^{\gamma \frac{\pi}{K_o m} + \varphi_n + \frac{2\pi}{K_o m} (n-1)} U_m \sin \left\{ \frac{\pi}{K_o m} [2(1-n+K_o) + \gamma] \right\} e^{-jqK_o \theta} d\theta. \quad (2)$$

Для получения однозначности фазовой привязки гармоник, в выражении (2) угловая координата φ_n зависит от вида соединений обмоток трансформаторов, питающих выпрямитель с ШИМ. При соединениях звезда - звезда угол $\varphi = 0$. При соединениях звезда - треугольник угол $\varphi = \frac{\pi}{6}$.

Вычислив в (2) интеграл и подставив пределы интегрирования, получим

$$\dot{U}_q = -\frac{U_m m}{j\pi q K_o} \sum_{n=1}^{K_o} \left[e^{-jqK_o \left(\frac{2\pi}{K_o m} (n-1) + \gamma \frac{\pi}{K_o m} - \varphi_n \right)} - e^{-jqK_o \left(\frac{2\pi}{K_o m} (n-1) - \gamma \frac{\pi}{K_o m} - \varphi_n \right)} \right] \times \sin \left\{ \frac{\pi}{K_o m} [2(n-1+K_o) + \gamma] \right\}, \quad (3)$$

Преобразуем в (3)

$$e^{-jq \frac{\pi}{m}} - e^{jq \frac{\pi}{m}} = \left[-j \sin q\gamma \frac{\pi}{m} - j \sin q\gamma \frac{\pi}{m} \right] = -2j \sin q\gamma \frac{\pi}{m}. \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) для комплексной величины q - й гармоники преобразуется к виду

$$\dot{U}_q = \frac{2U_m m}{\pi q K_o} \sin q\gamma \frac{\pi}{m} \sum_{n=1}^{K_o} \sin \frac{\pi}{K_o m} [2(1-n+K_o) + \gamma] e^{-jqK_o \left[\frac{2\pi}{K_o m} (n-1) - \varphi_H \right]}. \quad (5)$$

Перейдя к относительным единицам, приняв в качестве базовой величины среднее значение выпрямленного напряжения неуправляемого выпрямителя

$$U_{do} = U_m \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}, \text{ получим}$$

$$\dot{U}_q = \frac{2 \sin q\gamma \frac{\pi}{m} K_o}{q K_o \sin \frac{\pi}{m}} \sum_{n=1}^{K_o} \left\{ \sin \frac{\pi}{K_o m} [2(1-n+K_o) + \gamma] \right\} e^{-jqK_o \left[\frac{2\pi}{K_o m} (n-1) - \varphi_H \right]}, \quad (6)$$

где $q=1,2,3,\dots$ - номер гармоники.

Частота q - й гармоники равна

$$f_q = m \cdot q \cdot K_o \cdot f_o. \quad (7)$$

Выражение (6) имеет наглядную графическую интерпретацию. Для этого построим на комплексной плоскости K_o лучевую звезду, у которой центральные углы между соседними лучами

$$\varphi_n = -q \left[\frac{2\pi}{m} (1-n) - K_o \varphi_H \right]. \quad (8)$$

В тех случаях, когда q и m имеют общие делители, некоторые лучи накладываются друг на друга. Если теперь на каждом луче изобразить вектор длиной

$$a_n = \frac{2 \sin q\gamma \frac{\pi}{m}}{q K_o \sin \frac{\pi}{m}} \sin \frac{\pi}{K_o m} [2(1-n+K_o) + \gamma], \quad (9)$$

то геометрическая сумма всех K_o векторов и будет вектором q -й гармоники. Данное построение позволяет оценить зависимость амплитуд гармоник в функции относительной длительности импульсов широтно-импульсной модуляции.

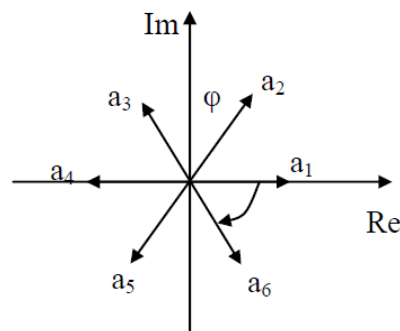


Рис.2- Векторная диаграмма вектора q -й гармоники выходного напряжения

Анализ выражения (8) показывает, что для трех фазной мостовой схемы выпрямителя центральные углы между соседними лучами кратны $\pi/3$. На рис. 2 приведена обобщенная векторная диаграмма составляющих результирующего вектора q -й

гармоники выходного напряжения. Приведенная векторная диаграмма построена для следующих параметров: $m=6$, $K_o=6$, $\varphi_n=0$. В этом случае центральные углы между соседними лучами определяются следующим образом

$$\varphi_n = -q \frac{\pi}{3} (1 - n). \quad (10)$$

6. Выводы из исследований и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Установлено, что гармонический состав выходного напряжения выпрямителя с широтно-импульсной модуляцией содержит

информацию о гармониках вызываемых пульсационной составляющей выпрямителя и широтно-импульсной модуляцией. Показано, что отображение гармоник на комплексной плоскости позволяет наглядно иллюстрировать процесс их образования.

Список литературы

1. Шавелкин А.А. Преобразовательная техника / А.А. Шавелкин, А.М.Наливайко// ДДМА.- Краматорск, 2008.-328с.
2. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / Н.В. Панасенко, В.В. Божко, Ю.П. Гончаров [и др.] // Залізничний транспорт України. – 2007. – №4. – С.76–80.
3. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники / Ю.К. Розанов. - М.: Энергоатомиздат,1992.-296с.
4. Grzegorz Benysek, Marian Pasko Editors Power Theories for Improved Power Quality.- Springer-Verlag London 2012.-216p.
5. Wei L. Novel Matrix Converter Topology with Simple Commutation/ L.Wei, T. A Lipo // Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.- Chicago (USA).- Sept.30-Oct.4,2001.-Vol.3.
6. Івакіна К.Я. Аналіз електромагнітних процесів випрямляча з широтно-імпульсною модуляцією /К.Я.Івакіна// Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця, 2013. –№ 6. – С. 65-67.

Івакіна Катерина Яківна, канд. техн. наук, кафедра електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Ivakina Katerina Yakivna, candidate tehnicny Sciences. Department electric of transport Kharkiv National University of Municipal Management named after A.N. Beketova. E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Стаття постуила 20.05.2015

УДК 621.315.21

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Кандидати техн. наук О.І. Акімов, Д.Л. Сушко, ст. викл. В.В Панченко, магістрант Д.А. Стояновський

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРАТЕГИИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Кандидаты техн. наук А.И. Акимов, Д.Л. Сушко, ст. преп. В.В Панченко, магистрант Д.А. Стояновский

THE CHOISE OF EFFICIENT STRATEGY FOR ELECTRICAL EQUIPMENT MAINTENANCE

Cand. of techn. sciences O.I. Akimov, D.L. Sushko, senior lecturer V.V. Panchenko, postgraduate D.A. Stojanovskiy

Розглянута методика оцінки ступеня доцільності застосування тієї чи іншої стратегії обслуговування і ремонту електрообладнання. Всі систематизовані профілактичні заходи зведені до трьох стратегій технічного обслуговування. На підставі розгляду можливостей застосування цих стратегій сформована запропонована методика.

Ключові слова: стратегія обслуговування, додаткові витрати, ресурс роботи, працездатність елементів, необхідні і достатні умови, доцільність.

Рассмотрена методика оценки степени целесообразности применения той или иной стратегии обслуживания и ремонта электрооборудования. Все систематизированные профилактические мероприятия сведены к трем стратегиям технического обслуживания. На основе рассмотрения возможностей применения этих стратегий и сформирована предлагаемая методика.

Ключевые слова: стратегия обслуживания, дополнительные затраты, ресурс работы, работоспособность элементов, необходимые и достаточные условия, целесообразность.

The support of electrical equipment of the systems power supply in the permanent readiness to application needs conducting prophylactic measures. In case of development planned-preventive measures on service and repair of electrical equipment it has to decide a task of choice of optimum strategy of their technical service. For the decision of this task all prophylactic measures are taken to the three strategies of technical service. A development of methods of evaluation of degree of expedience of application of that or else strategy of service and repair of electrical equipment is actual question.

All three strategies are considered in articles after the identical criteria, their comparison is conducted and scopes of their application are definite. Scopes of expedience of use of indicated strategies are definite through cost of replacements of elements, that be executed in order of repairs, middle duration of use of element, and subsequent in pairs comparison of these strategies. Necessary and sufficient conditions of application of that or else strategy of technical service are definite. On the basis of considered possibilities of application of these strategies and an offered method is formed.

The offered method will allow scientifically to ground planning prophylactic measures on renewal of capacity of electrical equipment.

Key words: service policy, additional expenditure, workability, elements efficiency, necessary and sufficient conditions, expediency.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Підтримання електрообладнання систем електропостачання в постійній готовності до застосування досягається систематизованими профілактичними заходами, основу яких складає проведення стандартних, післяоглядових, періодичних та позапланових (аварійних) ремонтів обладнання [1].

При розробці планово-попереджувальних заходів з обслуговування і ремонту електроагрегатів доводиться вирішувати задачу вибору раціональної стратегії технічного обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час в періодичній вітчизняній і закордонній літературі приділяється багато уваги розробці методик оцінювання ступеня доцільності застосування тієї чи іншої стратегії обслуговування і ремонту електрообладнання різних систем електропостачання [2-10]. Цей інтерес зрозумілий, т.к. різні стратегії по-різному і коштують. Але вибір такої стратегії, яка з точки зору вимог, що пред'являються до надійності електроагрегатів, і врахування умов їх експлуатації була би найбільш оптимальною, залишився за межами розгляду.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою статті є розгляд задачі вибору раціональної стратегії технічного обслуговування.

Основна частина дослідження. При розробці планово-попереджувальних заходів з обслуговування і ремонту електроагрегатів в першу чергу доводиться вирішувати задачу вибору раціональної стратегії технічного обслуговування, тобто такої стратегії, яка з

точки зору вимог, пред'являємих до надійності агрегатів, та врахування умов їх експлуатації була б найбільш оптимальною.

Розглянемо можливості застосування таких стратегій технічного обслуговування.

1. За результатами відмов елементів проводяться тільки позапланові ремонти (стратегія 1).
2. При попереджувальному ремонті через певні інтервали часу t_{Π} проводиться заміна елементів агрегату незалежно від технічного стану (стратегія стандартних ремонтів або стратегія 2).
3. При попереджувальному ремонті через певні інтервали часу t_{Π} проводиться огляд агрегату та заміна лише непридатних до подальшої експлуатації елементів (стратегія післяоглядових ремонтів або стратегія 3).

Очевидно, що проведення позапланованих ремонтів завжди вигідно в тому випадку, коли експлуатація агрегату не приводить до додаткових витрат із-за раптовості відмови, тоді як ресурс працездатності елементів агрегату використовується повністю. При наявності деяких таких витрат віддають перевагу стратегії стандартних ремонтів. В той же час стратегія післяоглядових ремонтів дозволяє повністю використовувати технічний ресурс працездатності агрегату.

Визначимо границі доцільності використання вказаних вище стратегій. Позначимо через C_a і C_{Π} вартості замін елементів, що виконані відповідно в порядку позапланового (аварійного) та планово-попереджувального ремонтів.

При виборі стратегій 1, 2, 3 середня вартість ремонту відповідно дорівнює:

$$C_1 = \frac{C_a}{m_t}; \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{C_{\Pi} + C_a \cdot H(t_{\Pi})}{t_{\Pi}}; \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{C_a - (C_a - C_{\Pi}) \cdot P_3}{\int_0^{t_{\Pi}} [1 - F(t)] dt}, \quad (3)$$

де m_t – середній час безвідмовної роботи елемента;
 $H(t_{\Pi})$ – значення функції відновлення у проміжку $[0, t_{\Pi}]$;
 P_3 – імовірність заміни елемента після його огляду.

Середня тривалість використання елемента при технічному обслуговуванні його за стратегією 3 буде дорівнювати:

$$m'_t = \int_0^{t_{\Pi}} [1 - F(t)] dt. \quad (4)$$

Порівняємо попарно стратегії 1, 2, 3.

При порівнянні стратегій 1 і 2 значення функції відновлення за умови $t > \frac{m_t^3}{\sigma_t^2}$

запишемо [2] в такому виді:

$$H(t) = \frac{t}{m_t} + \frac{\sigma_t^2 - m_t^2}{2m_t^2}, \quad (5)$$

де σ_t – середньоквадратичне відхилення величини t .
 Використавши вирази (2) і (5) маємо:

$$C_2 = C_1 + \frac{1}{t_{\Pi}} \left[C_{\Pi} + \frac{C_a}{2} \left(\frac{\sigma_t^2}{m_t^2} - 1 \right) \right], \quad (6)$$

а за умови, що $C_2 < C_1$, отримаємо вираз:

$$C_{\Pi} + \frac{C_a}{2} \left(\frac{\sigma_t^2}{m_t^2} - 1 \right) < 0,$$

або

$$\frac{C_{\Pi}}{C_a} < \frac{1 - \vartheta^2}{2}, \quad (7)$$

де $\vartheta = \frac{\sigma_t}{m_t}$ – коефіцієнт варіації.

Оскільки $0 < \frac{C_{\Pi}}{C_a} \leq \frac{1}{2}$, то з виразу (7) виходить $0 < \vartheta < 1$.

Щоб стратегія 2 була кращою стратегії 1, необхідно і достатньо виконання таких умов:

$$0 < \frac{C_{\Pi}}{C_a} < \frac{1}{2}; \quad (8)$$

$$0 < \vartheta < 1.$$

Слід зазначити, що при будь-якому значенні ϑ та при $\frac{C_{\Pi}}{C_a} > \frac{1}{2}$ кращою є стратегія 1.
 При порівнянні стратегій 1 і 3, взявши відношення виразів (3) до (1), отримаємо:

$$\frac{C_3}{C_1} = \frac{m_t}{m'_t} (1 - P_3 + \frac{C_{\Pi}}{C_a} \cdot P_3). \quad (9)$$

У випадку, якщо $C_3 < C_1$, з виразу (9) отримаємо необхідні і достатні умови вигідності використання стратегії 3:

$$\frac{C_{\Pi}}{C_a} < [\frac{1}{P_3} (\frac{m'_t}{m_t} - 1) + 1]. \quad (10)$$

Для порівняння стратегій 2 і 3 вираз (3) запишемо в такому виді:

$$C_3 = \frac{C_a}{m'_t} (1 - P_3) + \frac{C_{\Pi}}{m'_t} \cdot P_3. \quad (11)$$

Виявляється, стратегія 3 буде кращою ніж стратегія 2 у тому випадку, якщо $C_3 < C_2$. Тоді, порівнюючи вирази (6) і (11), отримаємо необхідні і достатні умови доцільності застосування стратегії 3:

$$\frac{C_{\Pi}}{C_a} < \frac{\frac{\vartheta^2 - 1}{2t_{\Pi}} + \frac{P_3 - 1}{m'_t} + \frac{1}{m_t}}{\frac{P_3 - 1}{m'_t} - \frac{1}{t_{\Pi}}}. \quad (12)$$

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Запропонована методика визначення необхідних та достатніх умов доцільності застосування цієї чи іншої стратегії технічного обслуговування дозволить науково обґрунтовано планувати профілактичні заходи по відновленню працездатності електроагрегатів.

Список використаних джерел

1. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]: утв. приказом Министерства топлива и энергетики от 25 июля 2006г. №258 (в редакции приказа Министерства энергетики и угольной промышленности от 13 февраля 2012г. №91). – Харьков: Изд-во « Форт », 2012. – 404 с.
2. Кокс, Д. Р. Теория восстановления [Текст]: монография/ Д.Р. Кокс, В. Л. Смит.–М.: Сов. радио, 1967. – 299 с.
3. Вайда Д., Исследования поврежденных изоляции [Текст]/ Д. Вайда; пер. с венг. Т. З. Партоша; под. ред. Д. В. Разевига. – М. : Энергия, 1968. – 400с.
4. Городецкий, С. С. Испытания кабелей и проводов [Текст]: учеб. пособие для техникумов/ С.С. Городецкий, Р. М. Лакерник. – М.: Энергия, 1971. –272 с.
5. Канискин, В. А.. Оценка технического состояния кабелей и кабельных сетей [Текст]: монография/ В. А. Канискин, А. А. Пугачев, А. И. Таджикибаев. –С.Пб. : ПЭИПК, 2007. – 173с.
6. Герцбах, И. Б. Модели профилактики. Теоретические основы планирования профилактических работ [Текст]: монография/ И.Б. Герцбах. – М.: Сов.радио, 1969. – 214с.
7. Акімов, О. І. Можливість прогнозу відмов кабельних ліній електропередачі [Текст] / О.І. Акімов, Ю.О. Акімова// Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 143. – С. 184 – 188.

8. Nazarychev, A. Maintenance and repair electric equipment at power stations and substations taking into account the technical condition [Text] / A.Nazarychev // Power and Electrical Engineering / Scientific Proceedings of Riga Technical University. - Riga, Latvia, 2002. - Vol. 5. - P. 40 - 45.
9. Blazer, G. Evaluation of failure data of hv circuit-breakers for condition based maintenance [Text] / G. Blazer, D.Drescher, F.Heil, P.Kirchesch, R.Meister, C.Neumann // CIGRE. – 2004. - Report A3-305.
10. Nigris, M., Application of modern techniques for the condition assessment of power transformers [Text] / M. de Nigris, R. Passaglia, R. Berti, L. Bergonzi, R. Maggi.// CIGRE. – 2004. - Report A2-209.

Акімов Олександр Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел. 730-10-75.

Сушко Дмитро Леонідович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.

Панченко Владислав Вадимович, ст. викл. кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.

Стояновський Дмитро Арнольдівич, магістрант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.

Акімов Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем электрического транспорта Украинской государственной академии железнодорожного транспорта. Тел. 730-10-75.

Сушко Дмитрий Леонидович, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем электрического транспорта Украинской государственной академии железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-75.

Панченко Владислав Вадимович, ст. препод. кафедры автоматизированных систем электрического транспорта Украинской государственной академии железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-75.

Стояновский Дмитрий Арнольдвич, магистрант кафедры автоматизированных систем электрического транспорта Украинской государственной академии железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-75.

Akimov Alexander Ivanovich, cand. of techn. sciences, Associated Professor department of the automated systems of electric transport of the Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-75.

Sushko Dmitriy Leonidovich, cand. of techn. sciences, Associated Professor department of the automated systems of electric transport of the Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-75.

Panchenko Vladislav Vadimovich, sen. lectures department of the automated systems of electric transport of the Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-75.

Stojanovskiy Dmitriy Arnoldovich, mahystrant department of the automated systems of electric transport of the Ukrainian state academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-75.

Стаття постуила 21.04.2015

УДК 621.314

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ АКТИВНОГО ФІЛЬТРА ПОСЛІДОВНОГО ТИПУ З ІМПУЛЬСНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ

Д-р техн. наук Я.В. Щербак, асп. Ю.О. Семененко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАБОТЫ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ТИПА С ИМУЛЬСНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ

Д-р техн. наук Я.В. Щербак, асп. Ю.А. Семененко

SIMULATION OF WORK ACTIVE FILTER SEQUENCES OF TYPE C IMULSNOY MANAGEMENT SYSTEM

Doct. of techn. sciences Y.V. Shcherbak, postgraduate Y.O. Semenenko

У статті приведені результати дослідження процесів роботи активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування за допомогою комп'ютерної моделі в

середовищі MATLAB. Запропонована структура активного фільтра, що входить до складу комбінованого, може використовуватися на тягових підстанціях постійного струму, як фільтрокомпенсуючий пристрій для придушення змінної складової вихідної напруги, а також для покращення якості електричної енергії контактної мережі постійного струму.

Ключові слова: активний фільтр, спектральний склад, імпульсна система керування, змінна складова, тягова підстанція, гармонійні складові.

В статье приведены результаты исследования процессов работы активного фильтра последовательного типа с импульсной системой управления с помощью компьютерной модели в среде MATLAB. Предложенная структура активного фильтра, входящего в состав комбинированного, может использоваться на тяговых подстанциях постоянного тока, как фильтрокомпенсирующее устройство для подавления переменной составляющей выходного напряжения, а также для улучшения качества электрической энергии контактной сети постоянного тока.

Ключевые слова: активный фильтр, спектральный состав, импульсная система управления, переменная составляющая, тяговая подстанция, гармонические составляющие.

The paper presents the results of research work processes active filter series type with pulse control system with the help of computer models in an environment MATLAB. It is advisable to apply for DC traction substations to suppress the variable component of the rectified voltage, which is the source of interfering effects on circle rail robot, automation and communication. In practice, the operation of electric power systems of transport, the use of passive filtration method has some significant drawbacks, which requires finding more effective methods. Increasing the degree of filtering ripple is achieved by using combined systems, which are connected by a combination of a specific pattern of passive and active filters. The proposed structure of the active filter, which is part of the combination, can be used for traction substations DC filter-like device to suppress the variable component of the output voltage, as well as to improve the quality of electric power catenary DC.

Keywords: active filter, spectral composition, impulse control system, the variable component, traction substation, the harmonic components.

Вступ

На діючих тягових підстанціях постійного струму в даний час у більшості випадків використовуються шестипульсні випрямні агрегати, виконані за трифазною мостовою схемою чи схемою «дві зворотні зірки з зрівняльним реактором». При модернізації підстанцій або на нових споруджуваних підстанціях встановлюються більш сучасні дванадцятипульсні випрямлячі. Однак ні один з цих випрямлячів не дає високих показників постійної напруги на своєму виході. Випрямлена напруга тягової підстанції постійного струму характеризується наявністю постійної та пульсуючої складових з гармоніками в широкому діапазоні частот. Дані гармонійні складові викликають додаткові втрати електричної енергії в тяговій мережі, погіршують електромагнітну сумісність тягової

підстанції з електричним рухомим складом, а також являються джерелом небезпечних та заважають перешкод, здатних викликати нестабільну роботу пристроїв залізничної сигналізації, централізації, блокування, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботах [1,2] для підвищення якості напруги контактної мережі пропонується використовувати активні фільтри. Підвищення ступеню фільтрації пульсації досягається застосуванням комбінованих систем, які представляють собою комбінацію з'єднаних за певною схемою пасивного та активного фільтра [3-5]. В роботі [6] подано теоретичні дослідження і розробки системи автоматичного управління для стабілізації напруги безпосередньо на струмоприймачах рухомого складу. При цьому залишається невирішеною проблема компенсації

низькочастотних гармонік напруги і струму в контактній мережі частотою нижче 300 Гц.

Визначення мети та задачі дослідження

Метою даної роботи є дослідження ефективності роботи активного фільтра послідовного типу, побудованого на базі високочастотного інвертора напруги, за

допомогою комп'ютерної моделі розробленої в середовищі MATLAB.

Основна частина дослідження

Вихідна напруга m -пульсного перетворювача характеризується широким спектром гармонійних складових з частотами:

$$f_q = f_c \cdot m \cdot q, \quad (1)$$

де f_c – частота мережі, що живить випрямляч;

m – еквівалентна пульсність схеми випрямлення;

$q = 1, 2, 3, \dots$ - порядковий номер гармоніки.

Спектральний склад гармонійних складових вихідної напруги випрямляча залежить від наступних джерел несиметрії [6-10]:

- несиметрія мережі, яка живить силову схему, що оцінюється величиною коефіцієнта несиметрії ε ;

- власна несиметрія системи імпульсно-фазового управління, найбільш характерна для багатоканальних СІФУ;

- несиметрія напруг мережі, синхронізуючих систему управління перетворювача.

При впливі перерахованих факторів випрямлячем в вихідну напругу генеруються неканонічні гармоніки, кратні частоті живильної мережі (50, 100, 150, 200 Гц і т.д.), що майже не придушуються пасивним фільтром. Дані гармонійні складові збільшують коефіцієнт пульсацій напруги і створюють значний заважаючий вплив на пристрої системи автоблокування [2].

В роботі [1] авторами проведено дослідження динамічних характеристик комбінованого фільтра з активним фільтром послідовного типу неперервної дії. Основою такого активного фільтра є підсилувач, що формує напругу компенсації змінної складової вихідної напруги тягової підстанції постійного струму. Для підвищення коефіцієнта корисної дії системи активної фільтрації пропонується використати імпульсний спосіб формування напруги компенсації змінної складової шляхом застосування інвертора напруги на

IGBT, що працює з підвищеною частотою широтно-імпульсної модуляції порядку 20 кГц. Завдяки цьому досягається висока якість формування гармонік напруги компенсації в широкому діапазоні частот. Схема активного фільтра послідовного типу імпульсної дії, що пропонується для зниження величини пульсацій змінної складової у вихідній напрузі тягової підстанції постійного струму, представлена на рис. 1.

Запропонований фільтр має пасивну та активну ланки. Пасивна ланка фільтра складається з дроселя L та конденсатора C . Активна ланка складається з інвертора I , вихідний сигнал якого через трансформатор T подається в коло пасивної ланки. Із вихідного сигналу датчика напруги $ДН$ датчиком пульсацій $ДП$ виділяється змінна складова, яка несе інформацію про пульсації напруги активно-індуктивного навантаження. Вихідний сигнал датчика пульсацій являє собою сигнал зворотного зв'язку, який подається на вхід суматора, на другий вхід якого подається напруга завдання U_z . Вихідний сигнал суматора передається на корегуючу ланку $G(p)$, яка формує сигнал керування, далі на інвертор I , трансформатор T та дросель L і врешті решт подається в протифазу з напругою пульсацій, що діє на навантаженні. Компенсація змінної складової здійснюється внесенням в ланцюг пасивної ланки напруги компенсації пульсацій, яка формується каналом зворотного зв'язку.

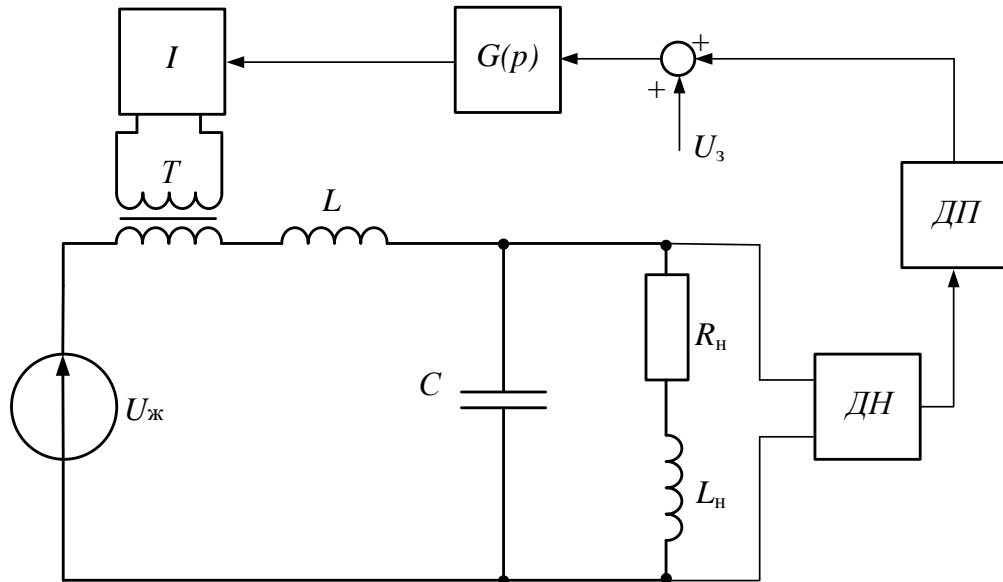


Рис. 1 Структурна схема активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування

Для аналізу ефективності роботи активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування (рис. 1) була розроблена комп'ютерна модель даного активного фільтра в середовищі MATLAB (рис. 2).

В даній комп'ютерній моделі блок Substation імітує роботу трифазної мережі живлення. Сигнал струму активно-індуктивного навантаження R_H , L_H

вимірюється блоком I_H , і через послідовно з'єднані два блоки $G_0(p)$ та $G_1(p)$, та підсилювачі $K1$ і $K2$, надходить на вхід блока *Invertor*, який у свою чергу формує компенсуючий сигнал. Розділяючий трансформатор T служить для гальванічної розв'язки силової частини схеми та блока *Invertor*. Детермінований Г-подібний LC-фільтр представлений згладжувальним реактором L та конденсатором C .

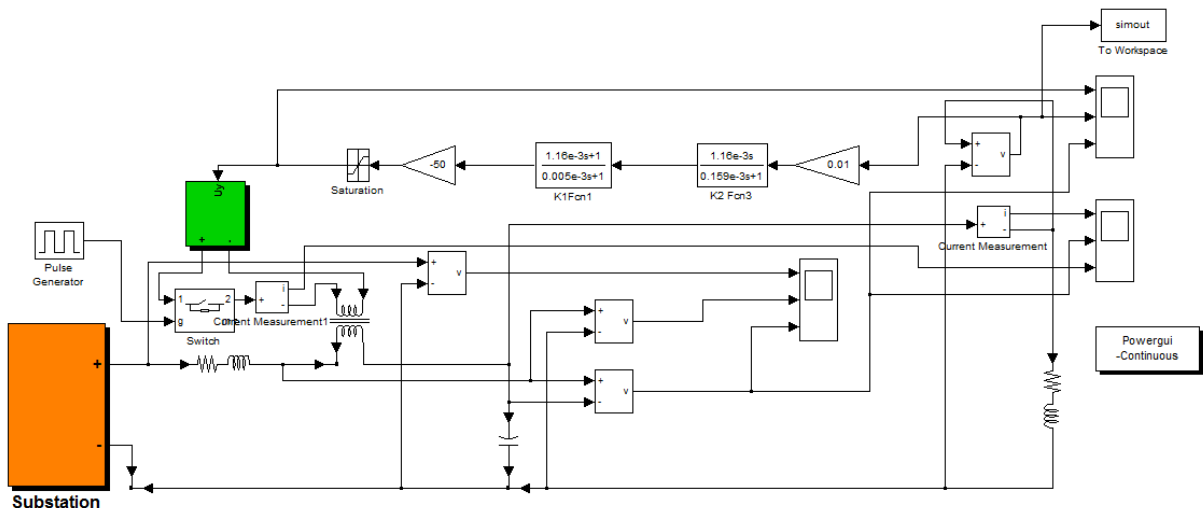


Рис. 2 Комп'ютерна модель активного фільтра послідовного типу з імпульсною системою керування в середовищі MATLAB

Досліджуємо схему (рис. 2) при симетричній трифазній вхідній напрузі та активно-індуктивному навантаженні $R_H = 1$

Ом та $L_H=10^{-3}$ Гн (рис. 3) та $R_H = 10$ Ом та $L_H=10^{-3}$ Гн (рис. 4).

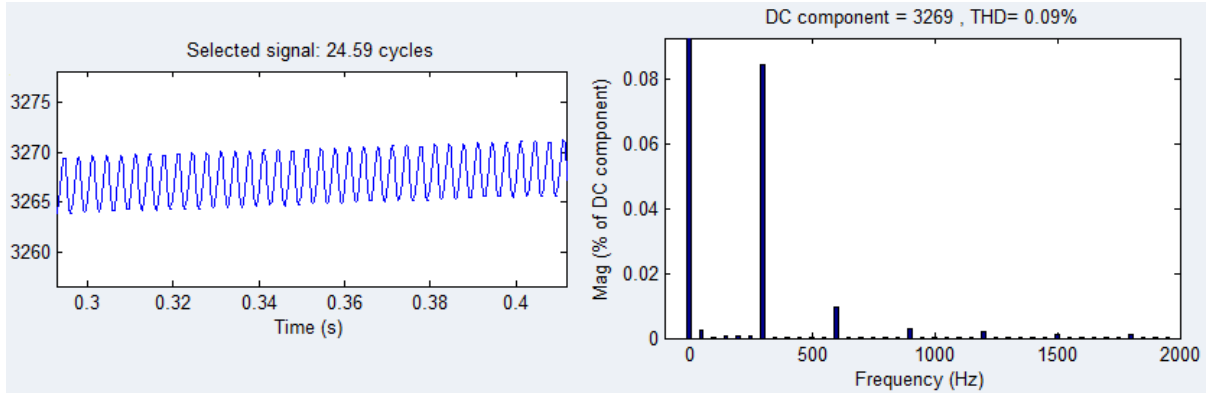


Рис. 3 Пульсації вихідної напруги тягової підстанції з активним фільтром послідовного типу та діаграма спектрального складу при $I_{H0} = 3264$ А

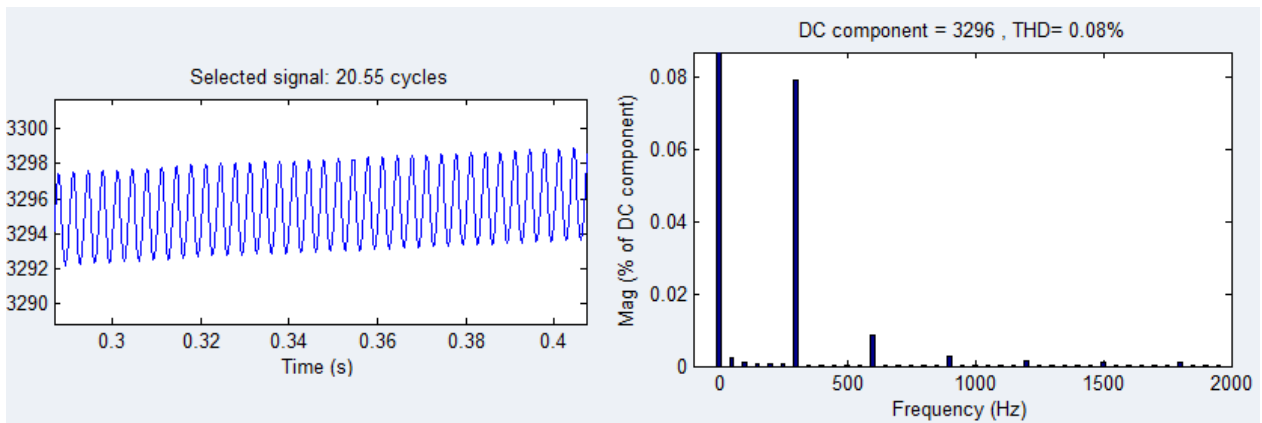


Рис. 4 Пульсації вихідної напруги тягової підстанції з активним фільтром послідовного типу та діаграма спектрального складу при $I_{H0} = 330$ А

За результатом аналізу одержані часові діаграми схеми при симетричній трифазній вхідній напрузі та активно-індуктивному навантаженні, необхідно зазначити наступне, що отриманий спектральний склад відображає наявність найбільш суттєвої основної гармоніки випрямленої напруги (300 Гц) її відносна амплітуда при $I_{H0} = 3264$ А дорівнює 0,09%; а при $I_{H0} = 330$ А дорівнює 0,08% та про зростання коефіцієнта

пульсацій вихідної напруги при збільшенні струму навантаження.

Далі досліджуємо схему активного фільтра послідовного типу при несиметрії трифазної вхідної напруги та активно-індуктивному навантаженні $R_H = 1$ Ом та $L_H = 10^{-3}$ Гн (рис. 5) та $R_H = 10$ Ом та $L_H = 10^{-3}$ Гн (рис. 6). Несиметрія створювалась зменшенням на 2,5 % напруги фази С відносно напруг інших двох фаз.

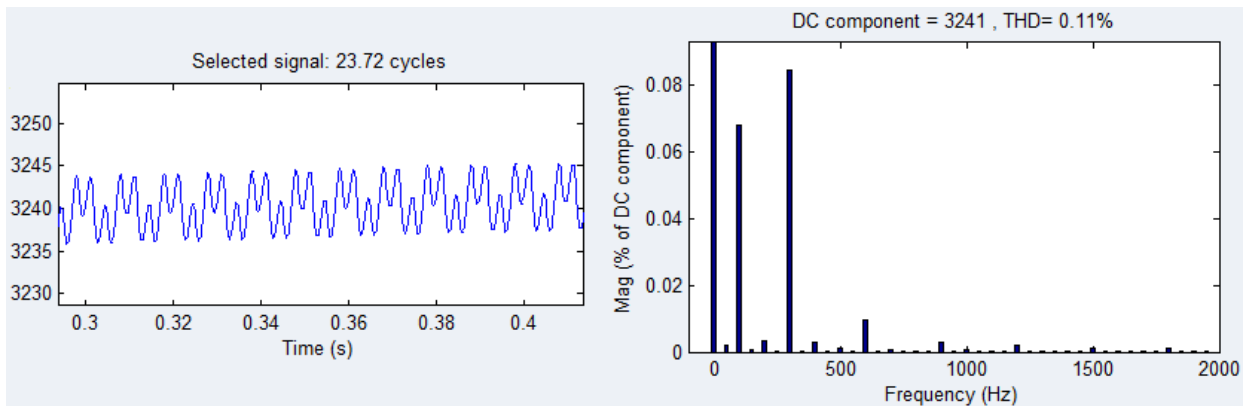


Рис. 5 Пульсації вихідної напруги тягової підстанції з активним фільтром послідовного типу та діаграма спектрального складу при несиметрії вхідної напруги 2,5 % по одній із фаз та при $I_{H0} = 3242$ А

Із рис. 5 слідує, що наявність несиметрії вхідної напруги випрямляча, як і в випадку з активним навантаженням, призводить до появи неканонічних гармонік.

Відносна амплітуда неканонічної гармоніки частотою 100 Гц дорівнює 0,07 %, а коефіцієнт пульсацій – 0,11 %.

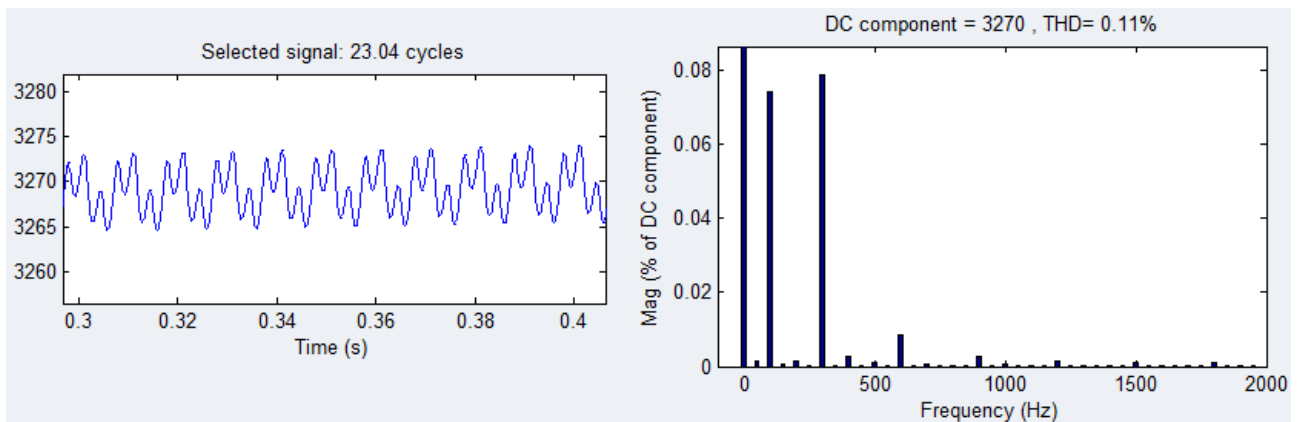


Рис. 6 Пульсації вихідної напруги тягової підстанції з активним фільтром послідовного типу та діаграма спектрального складу при несиметрії вхідної напруги 2,5 % по одній із фаз та при $I_{n0} = 327$ А

З діаграми спектрального складу рис. 6 зниження струму навантаження при наявності такої ж несиметрії вхідної напруги випрямляча призводить до збільшення неканонічних гармонік, а також ніяк не вплинуло коефіцієнт пульсацій вихідної напруги. Відносна амплітуда неканонічної гармоніки частотою 100 Гц дорівнює 0,07 %, а коефіцієнт пульсацій – 0,11 %, що не виходить за межі допустимого значення [11].

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку

Проведене дослідження роботи активного фільтра послідовного типу з

імпульсною системою керування за допомогою комп'ютерної моделі в середовищі MATLAB показало, що застосування такої схеми фільтра дозволить підвищити якість електричної енергії в контактній мережі постійного струму за рахунок замкнутої структури автоматичного регулювання, що забезпечує компенсацію гармонік напруги та струму контактної мережі в широкому діапазоні частот. Таким чином досягається необхідний рівень електромагнітної сумісності із суміжними електроустановками.

Список використаних джерел

1. Щербак, Я.В. Аналіз динамічних характеристик комбінованого фільтра тягової підстанції [Текст] / Я.В. Щербак, Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, №142. – 2013 р. – С. 137-143.
2. Щербак, Я.В. Активна фільтрація вихідної напруги тягової підстанції постійного струму [Текст] / Я.В. Щербак., Ю.О. Семененко // Збірник наукових праць УкрДАЗТ, №127. – 2011 р. – С. 146-151.
3. Губаревич, В.Н. Основы проектирования активных энергетических фильтров [Текст] / В.Н. Губаревич, В.М. Рябенский, А.А. Шерман // АН УССР. – К.: ИЭД, 1979. – №192. – 44 с.
4. Design considerations for maintaining DC side voltage of hybrid active power filter with injection circuit/ A.Luo, Z.Shuai, J.Shen [et. al.]// Power Electronics, IEEE Transactions.- 2009.- vol. 24.- P. 75-84.

5. Гусев, И.И. Активный фильтр компенсационного типа для мощных вентильных преобразователей [Текст] / И.И. Гусев, А.А. Шерман, Г.В. Ахвердян [и др.] // ЭП. Преобразовательная техника. – 1980. – №4. – С. 15-18.
6. G.T. Heydt, Y. Liu, “Second harmonic components in power system voltages and currents”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521-523.
7. Johan Lundquist, On Harmonic Distortion in Power Systems, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Technical report no 371L, Göteborg, Sweden, P.147. – 2001.
8. Dán A. Filtering of harmonics generated by thyristor controlled AC traction systems/ A. Dán, J. Kisvölcsy, Gy. Varjú// In Proc. II. International Conference on Harmonics in Power Systems, pp.404-413., Winnipeg, 6-7.- October, 1986.
9. Ludbork Allan Harmonic filtered for notch reduction // IEEE IAS 21-th Annu. Denver. – P. 1043 – 1047.
10. Stephen M. Williams, Richard G. Hoff. Discrete controlled harmonic and reactive power compensator // IEEE/ IAS 23-th Annu. Mact. Pittsburgh (Pennsylvania). – Oct. 1988. – P. 881 – 887.
11. ЦЕ-0024 Інструкція з технічного обслуговування та ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення та секціонування електрифікованих залізниць, затверджена наказом Укрзалізниці [Текст] від 21.12.2007 року № 618-Ц.

Щербак Яків Васильович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-73. E-mail: sherbak47@mail.ru

Семененко Юрій Олександрович, аспірант кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту.

Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua

Shcherbak Yakiv Vasylovych, Doctor of Technical Sciences Professor Head of Department Department automated electric vehicle Ukrainian State University of Railway Transport tel.: (057) 730-10-73. E-mail: sherbak47@mail.ru

Semenenko Yuriy Oleksandrovich, Postgraduate Department automated electric vehicle Ukrainian State University of Railway Transport tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua

Стаття постуила 21.04.2015

УДК 621.314

ФАКТОР ПУЛЬСАЦИЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С ДВУХСТОРОННЕЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Доктор техн. наук Я.В. Щербак, канд. техн. наук Е.Я. Ивакина, инженер В.В. Панченко

ФАКТОР ПУЛЬСАЦИЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З ДВОСТОРОННЬОЮ ШИРОТНО – ІМПУЛЬСНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ

Доктор техн. наук Я.В. Щербак, канд. техн. наук К.Я. Івакіна, інженер В.В. Панченко

FACTOR PULSATIONS AUTOMATIC REGULATION WITH TWO-WAY PULSE WIDTH MODULATION

Dr. Sci. Sciences Y.V. Shcherbak, Cand. of techn. sciences K.Y. Ivakina, engineer V.V. Panchenko

Получены аналитические зависимости для фактора пульсаций системы автоматического регулирования содержащей преобразователь с двухсторонней ШИМ.

Показано, что преобразователь с двухсторонней ШИМ имеет два фактора пульсаций. Выражения для факторов пульсаций получены разложением передаточной функции приведенной непрерывной части на элементарные звенья с дальнейшим применением импульсной модели и применением математического аппарата z - преобразования.

Ключевые слова. Выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, замкнутая система автоматического регулирования, импульсная модель, приведенная непрерывная часть, z – преобразование.

Одержано аналітичні залежності які визначають фактор пульсацій системи автоматичного регулювання яка має перетворювач з двосторонньою ШИМ. Показано, що перетворювач з двосторонньою ШИМ має два фактора пульсацій. Вирази для факторів пульсацій одержано шляхом розкладу передавальної функції приведеної неперервної частини на елементарні ланки з подальшим застосуванням імпульсної моделі та математичного апарату z - перетворення.

Ключові слова. Випрямляч, широтно – імпульсна модуляція, замкнута система автоматичного регулювання, імпульсна модель, приведена неперервна частина, z – перетворення.

The authors obtained analytical dependences for the pulsation factor of the automatic control system containing a rectifier with double-sided pulse-width modulation. It is shown that a rectifier with double-sided pulse-width modulation has two pulsation factors. The expressions for pulsation factors are obtained through the expansion of the transfer function of the reduced continuous part into elementary units with the further usage of the impulse model and mathematical apparatus of z -transformation. It is determined that fluctuating component of the rectifier output voltage produces changes of pulsation factors on every digit-time slot of a pulse-width modulator.

Keywords. Rectifiers, pulse - width modulation, a closed system of automatic control, impulse model, reduced continuous part, z -transformations.

Введение. На входе системы управления преобразователем электрической энергии, содержащегося в замкнутой системе автоматического регулирования, наряду с гладкой составляющей, содержится переменная составляющая. Переменная составляющая вызывается дискретным характером преобразования электрической энергии. Период переменной составляющей и ее гармонический состав определяется

принципом работы преобразователя Π и свойством приведенной непрерывной части системы автоматического регулирования (см. рис.1). Попадая на вход преобразователя переменная составляющая сигнала управления $U_y(t)$ вызывает изменение его коэффициента передачи.

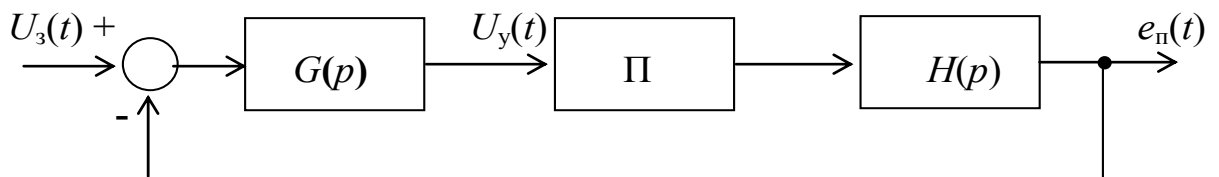


Рис.1. Обобщенная структурная схема САР с преобразователем

Изменение коэффициента передачи преобразователя учитывается фактором пульсаций F [1]

$$F^{-1} = 1 - \frac{\frac{dU_y(t)}{dt}}{\frac{dU_{on}(t)}{dt}}, \quad (1)$$

где $\frac{dU_y(t)}{dt}$ и $\frac{dU_{on}}{dt}$ - левосторонние значения произведения сигналов управления

$U_y(t)$ и опорного сигнала $U_{on}(t)$ относительно точки встречи.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Как следует из (1), основной задачей вычисления фактора пульсаций является определение производной от пульсирующей составляющей сигнала управления на n -том тактовом интервале преобразователя, что связано с определением реакции приведенной непрерывной части системы автоматического регулирования на выходной сигнал преобразователя.

Анализ последних исследований и публикаций. Методы определения фактора пульсаций для разных видов преобразователей электрической энергии в симметричном и несимметричном режимах, в режимах непрерывного и прерывистого

токов нагрузки рассмотрены в работах [1,2,3]. В этих работах рассмотрено нахождение фактора пульсаций систем автоматического регулирования, содержащих тиристорный выпрямитель и преобразователь постоянного напряжения с односторонней широтно-импульсной модуляцией.

Основная часть исследования. В данной работе рассматривается фактор пульсаций системы, содержащей выпрямитель в котором регулирование выходного напряжения выполняется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [4].

Процесс формирования выходного напряжения выпрямителя с ШИМ поясняется рис.2.

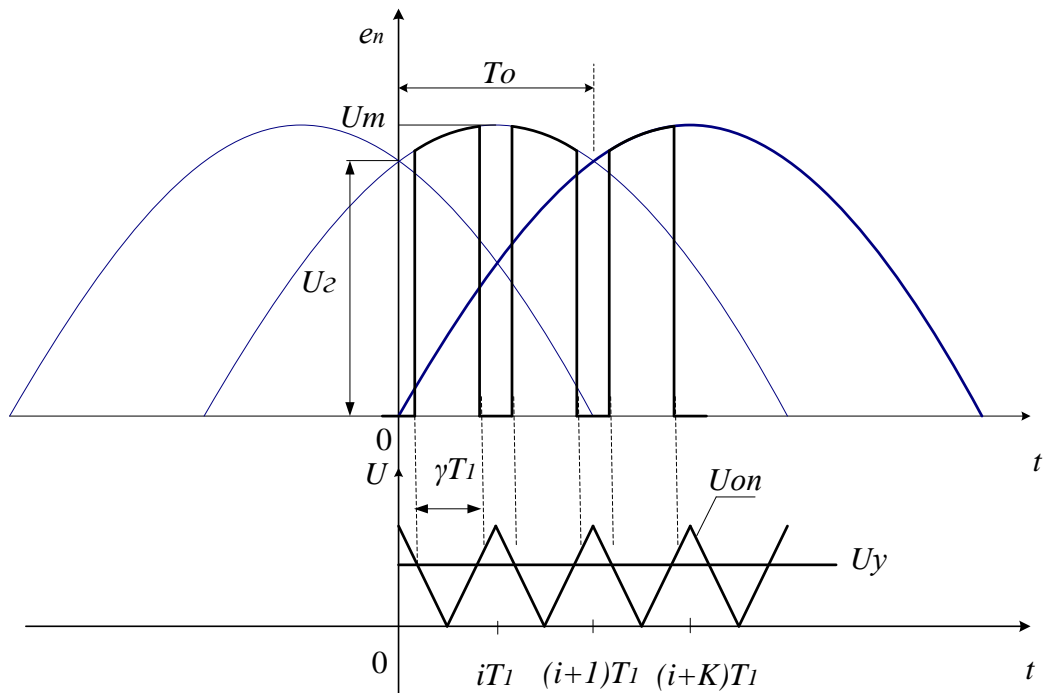


Рис.2. Выходное напряжение выпрямителя с двухсторонней ШИМ

В широтно-импульсном модуляторе с двухсторонним опорным сигналом на тактовом интервале содержатся две точки встречи сигнала управления $U_y(t)$ с опорным сигналом $U_{on}(t)$ (см. рис.3)

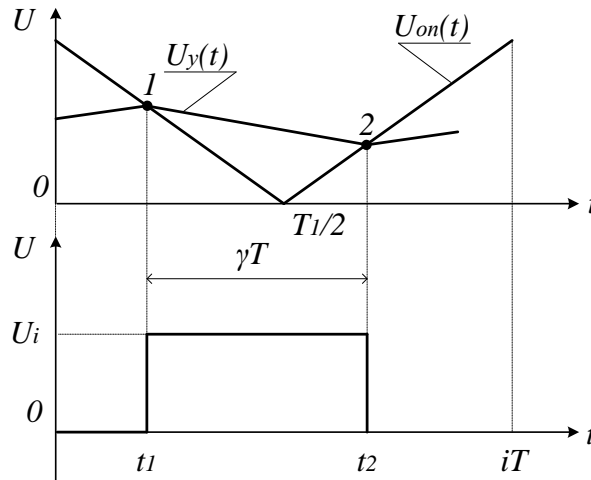


Рис. 3. Диаграммы напряжений ШИМ с двухсторонним опорным сигналом

Первая точка встречи определяет время t_1 , а вторая – t_2 . Из рис.3 следует, что для определения фактора пульсаций необходимо иметь левосторонние, относительно точки встречи, значения производных сигнала управления и опорного сигнала.

Для определения производных сигнала управления воспользуемся методом эквивалентных импульсных моделей [5]. Метод эквивалентных импульсных моделей базируется на применении математического

аппарата исследования импульсных систем. Он позволяет получить квазиустановившийся процесс в системе в замкнутой форме.

Представим в соответствии с [2, 6] передаточную функцию приведенной непрерывной части системы автоматического регулирования, содержащую выпрямитель с ШИМ, в виде суммы элементарных аperiodических звеньев

$$W(p) = \frac{K_j}{T_j p + 1}. \tag{2}$$

Обобщенная структурная схема, отображающая процесс формирования реакции приведенной непрерывной части, изображена на рис.4.

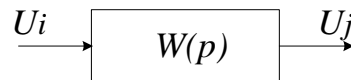


Рис.4. Обобщенная структурная схема формирования реакции приведенной непрерывной части

На входе приведенной непрерывной части действует импульсная последовательность U_i . Пульсационная составляющая выходного напряжения U_n (см. рис.2) вызывает амплитудно-импульсную модуляцию первого рода

(АИМ-1) импульсной последовательности выходного напряжения выпрямителя. В [7] показано, что переход от АИМ-1 к амплитудно-импульсной модуляции второго рода (АИМ-2) характеризуется для рабочих

часто ШИМ погрешностью не импульсной последовательности
 превышающей 0,2%.
 Переход от АИМ-1 к АИМ-2 последовательность преобразователя на
 характеризуется заменой реальной выходной импульсов прямоугольных

$$U_i = U_m \sin[\theta_m + (i - 1)] \frac{\theta_o}{K_o} + \theta_{i1}. \quad (3)$$

Аналитическое выражение для широтно-импульсного преобразователя
 выходного импульса вольтодобавочного удобно получить с помощью суперпозиции
 преобразователя на i -ом тактовом интервале двух ступенчатых функций, как это показано
 на рис.6.

$$U_{i1}(t) = U_i(t) - U_i(t - \gamma T_i). \quad (4)$$

Перейдя в (4) к операторной форме, получим

$$U_i(p) = \frac{1 - e^{-\gamma T_p}}{p} U_j(p). \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (5) получим передаточную функцию приведенной
 непрерывной части эквивалентной импульсной системы

$$W(p) = \frac{1}{p(T_j p + 1)} - \frac{e^{-\gamma T_p}}{p(T_j p + 1)}. \quad (6)$$

Формуле (6) соответствует приведенная на рис.5 структурная схема эквивалентной
 импульсной модели

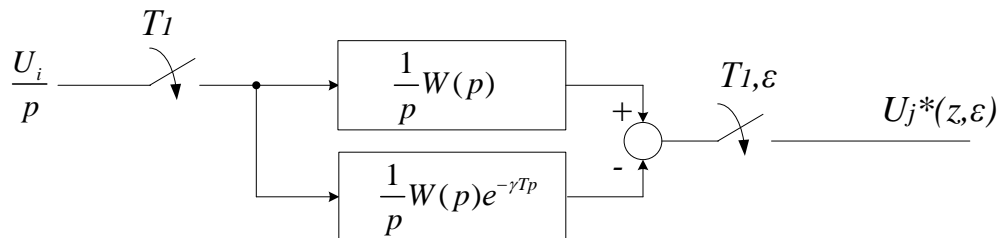


Рис. 5. Структурная схема эквивалентной импульсной модели

Из структурной схемы следует, что информация о реакции приведенной непрерывной части на выходную импульсную последовательность выпрямителя с ШИМ формируется двумя параллельными каналами. В одном из каналов осуществляется задержка информации на $t = \gamma T_1$. Из структурной схемы получаем выражение для выходного сигнала, записанное в форме модифицированного z-преобразования [8, 9]

$$U_j^*(z, \epsilon) = Z_\epsilon \left\{ \frac{U_i}{p} \right\} G^*(z, \epsilon), \quad (7)$$

где $G^*(z, \varepsilon) = Z_\varepsilon \left\{ \frac{W(p)}{p} - \frac{W(p)}{p} e^{-\gamma T p} \right\}$.

В соответствии с [8] получим

$$Z_\varepsilon \left\{ \frac{W(p)}{p} \right\} = K_j \left(\frac{z}{z-1} - \frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}} \right), \quad Z \left\{ \frac{U_i}{p} \right\} = K_j \frac{z}{z-1}. \quad (8)$$

Квазиустановившееся значение выходного сигнала приведенной непрерывной части при изменении параметра ε в диапазоне $0 \leq \varepsilon \leq \gamma$ определим, как

$$U_j^*(\varepsilon T_1) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} U_j^*(z, \varepsilon) = U_i K_j \left(1 - \frac{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}} e^{-\frac{T_1}{T_j}} \right). \quad (9)$$

Во время паузы между входными импульсами, когда $\gamma \leq \varepsilon \leq 1$, выходной сигнал равен

$$U_j^*(\varepsilon T_1) = U_i K_j \frac{e^{\frac{\gamma T_1}{T_j}} - 1}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} e^{-\frac{\varepsilon T_1}{T_j}}. \quad (10)$$

Для получения выражений, определяющих законы изменений производных сигнала управления замкнутой системы, определим:

когда $0 \leq \varepsilon \leq \gamma$

$$Z_\varepsilon \{p \cdot G(P)\} = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} - \frac{e^{-(1+\varepsilon-\gamma) \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right] = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{(z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}) e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right]. \quad (11)$$

когда $\gamma \leq \varepsilon \leq 1$

$$Z_\varepsilon \{p \cdot G(P)\} = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} - \frac{z \cdot e^{-(\varepsilon-\gamma) \frac{T_1}{T_j}}}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right] = \frac{K_j}{T_j} \left[\frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}} (1 - e^{\frac{\gamma T_1}{T_j}})}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right]. \quad (12)$$

На основании теоремы о дифференцировании в области оригинала [6] из (11) и (12), получим:

$$\frac{dU_y}{d\varepsilon T_1} \Big|_{0 \leq \varepsilon \leq \gamma} = \lim_{Z \rightarrow 1} \frac{U_i K_j}{T_j} \left[\frac{(z - e^{-\frac{(1-\gamma)T_1}{T_j}} - \varepsilon \frac{T_1}{T_j})}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} \right] = \frac{U_i K_j}{T_j} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{(1-\gamma)T_1}{T_j}} - \varepsilon \frac{T_1}{T_j}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}, \quad (13)$$

$$\frac{dU_y}{d\varepsilon T_1} \Big|_{\gamma \leq \varepsilon \leq 1} = \lim_{Z \rightarrow 1} \frac{U_i K_j}{T_j} \cdot \frac{z \cdot e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}} (1 - e^{\gamma \frac{T_1}{T_j}})}{z - e^{-\frac{T_1}{T_j}}} = \frac{U_i K_j}{T_j} \cdot \frac{(1 - e^{\gamma \frac{T_1}{T_j}}) e^{-\varepsilon \frac{T_1}{T_j}}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}. \quad (14)$$

На интервале $0 \leq t_1 \leq T_1/2$ опорный сигнал изменяется по закону

$$U_{OП}(t) = U_{OП\max} \left(1 - \frac{2t_1}{T_1}\right), \quad (15)$$

а на интервале $T_1/2 \leq t_2 \leq T_1$

$$U_{OП}(t) = U_{OП\max} \left(\frac{2t_2}{T_1} - 1\right). \quad (16)$$

Учитывая, что $\varepsilon T_1 = t$ из (15) и (16) получим значения производных опорного сигнала: для $0 \leq t_1 \leq T_1/2$

$$\frac{dU_{OП}(t)}{dt} = \frac{-2U_{OП\max}}{T_1}; \quad (17)$$

для $T_1/2 \leq t_2 \leq T_1$

$$\frac{dU_{OП}(t)}{dt} = \frac{2U_{OП\max}}{T_1}. \quad (18)$$

Подставив полученные выражения для производных сигнала управления (13), (14) и опорного сигнала (17), (18) в общее выражение для фактора пульсаций (1) получим:

$$F_1^{-1} \Big|_{t=iT_1} = 1 - K_i K_j \frac{T_1}{2T_j} \cdot \frac{(1 - e^{\gamma \frac{T_1}{T_j}}) e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}; \quad (19)$$

$$F_2^{-1} \Big|_{t=iT_1(1+\gamma)} = 1 + K_i K_j \frac{T_1}{2T_j} \cdot \frac{e^{-\gamma \frac{T_1}{T_j}} - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}{1 - e^{-\frac{T_1}{T_j}}}, \quad (20)$$

где $K_i = \frac{U_i}{U_{OP\max}}$ - статический коэффициент передачи выпрямителя с ШИМ на i -ом

тактовом интервале широтно-импульсного преобразователя.

Выводы из исследования, многоконтурных систем автоматического регулирования и систем со сложной передаточной функцией приведенной в данном направлении.

Полученные выражения во многом непрерывной части. В этих случаях являются общими так, как позволяют целесообразно применение предложенной в вычислять фактор пульсаций [10] методики.

Список использованных источников

1. Bjaresten, N. The Statik Converter as a High-Speed Power Amplifier [Text]/ N. Bjaresten // Direct Current.-1963.-Vol.6.-P.154-165.
2. Шипилло, В.П. Фактор пульсаций в системах регулирования с вентильными преобразователями [Текст] / В.П. Шипилло, Ю.С. Зинин // Электричество.- 1977.-№3.- С.86-89.
3. Шипилло, В.П. Устойчивость замкнутой системы с широтно-импульсным преобразователем [Текст] / В.П. Шипилло, И.И. Чикотило // Электричество.- 1978.- №1.- С.50-53.
4. Розанов, Ю.К. Основы силовой электроники [Текст] / Ю.К. Розанов // Энергоатомиздат,1992.-296с.
5. Щербак, Я.В. Анализ электромагнитных процессов ШИП применением эквивалентных импульсных моделей [Текст] / Я.В. Щербак // Інформаційно- керуючі системи на залізничному транспорті.- 2000. - №6. - С.89-95.
6. Конторович, М.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях [Текст] / М.И. Конторович // Сов. Радио, 1975. - 319с.
7. Ивакина, Е. Я. Повышение качества электрической энергии тяговой подстанции постоянного тока в замкнутых структурах [Текст] / Е.Я. Ивакина // Автореф. дис ... канд. техн. наук: 05.09.03/ ХНТУСХ им. П. Василенка.- Харьков, 2014. – с.25
8. Джури, Э. Импульсные системы автоматического регулирования [Текст] / Э. Джури // Физматиздат, 1963. – 455с.
9. Бесекерский, В.А. Теория систем автоматического регулирования [Текст] / В.А. Берсеркский, Е.П. Попов // М.: Наука, 1975.-767с.
10. Щербак, Я.В. Фактор пульсаций многоконтурных дискретных систем автоматического регулирования [Текст] / Я.В. Щербак // Технічна електродина-міка.- Київ, 1998.-№4.-С.41-43.

Щербак Яків Васильович, доктор техн. наук, кафедра автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту. E-mail: Sherbak47@mail.ru.

Ивакіна Катерина Яківна, канд. техн. наук, кафедра електричного транспорту Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова.

E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Панченко Владислав Вадимович, кафедра автоматизованих систем електричного транспорту Українського державного університету залізничного транспорту.

E-mail: vlad-zmyov@mail.ru.

Shcherbak Yakov Vasilyevich, Dr. Sc. Sciences, Department of the automated systems of electric transport Ukrainian State University of Railway Transport.

E-mail: Sherbak47@mail.ru.

Ivakina Katerina Yakivna, candidate tehnicny Sciences. Department electric of transport Kharkiv National University of Municipal Management named after A.N. Beketova.

E-mail: ivakina_katya@mail.ru.

Panchenko Vladyslav Vadymovych, Department of the automated systems of electric transport Ukrainian State University of Railway Transport

E-mail: vlad-zmyov@mail.ru.

Стаття поступила 20.05.2015

УДК 620.98

ВПЛИВ ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ БУДІВЛІ НА ПОКАЗНИКИ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ

Д-р техн. наук, проф. В.І. Дешко, аспір. Н.А. Буяк

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА

Д-р тех. наук, проф. В.И. Дешко, аспир. Н.А. Буяк

INFLUENCE OF BUILDING ENVELOPE ON THERMAL COMFORT INDICATORS

Doct. of techn. Sciences V.I. Deshko, postgraduate N.A. Buyak

У даній роботі проаналізовано різні моделі теплового комфорту. Серед яких виділяють наступні: адаптивна модель, модель PMV та модель, в основі якої – мінімум споживання ексергії людським тілом. Визначено вплив на показники теплового комфорту покращення теплового захисту огорожуючих конструкцій будівлі. Для аналізу обрано віртуальну модель кімнати та людини. Проаналізовано вплив теплового захисту одягу, температури внутрішнього, зовнішнього повітря на відчуття комфорту людиною

***Ключові слова:** адаптивна модель, тепловий комфорт, прогнозована середня оцінка якості внутрішнього середовища, прогнозований процент незадоволених температурним середовищем.*

В данной работе проанализированы различные модели теплового комфорта. Среди которых выделяют следующие: адаптивная модель, модель PMV и модель, в основе которой - минимум потребления эксергии человеческим телом. Определено влияние на показатели теплового комфорта улучшения тепловой защиты ограждающих конструкций здания. Для анализа избрана виртуальная модель комнаты и человека. Проанализировано влияние тепловой защиты одежды на ощущение комфорта человеком

***Ключевые слова:** адаптивная модель, тепловой комфорт, прогнозируемая средняя оценка качества внутренней среды, прогнозируемый процент недовольных температурной средой.*

The purpose of this paper is to introduce and to analyze different models of thermal comfort. Among them are the following: adaptive model, model PMV (based on the heat balance of the human body) and model based on minimum exergy consumption of human body. The virtual model of room and person was chosen. We analyze thermal comfort in the room with different thermal performance of the building envelope which satisfies standards of 80- year, modern and improved. Thermal comfort sensation of person weared in winter and summer clothes was analysed The author singles out the Predicted Percentage Dissatisfied of thermal environment as the main criteria of thermal comfort. This paper analyzes influence of thermal protection of the building envelope and person clothes on thermal comfort. It is shown that for the considered conditions the degree of sensitivity to various terms parameters of comfort model sequentially decreases in the number: internal air temperature, average radiation temperature, metabolic rate, clothing insulation, thermal protection of the building, the outside temperature.

Research has shown that to ensure comfortable conditions required to raise the temperature of internal air in the room. And increasing thermal performance of building envelope mainly affects on reduction of energy consumption.

Keywords: *adaptive model, thermal comfort, Predicted mean Vote, Predicted Percentage Dissatisfied.*

Вступ. При зростанні вимог енергозбереження до будівель та з появою різних видів будівель (енергозберігаюча, екологічна та будівля з низьким споживанням ексергії, а також будівля з низьким споживанням ексергії) та систем теплопостачання особливо актуальним стає забезпечення при цьому відповідних комфортних умов перебування людини.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Використання високоефективних та сучасних джерел тепла не є достатньо ефективним у будівлях із низьким тепловим захистом, тому вибір джерела тепла, покращення чи вибір теплового захисту будівель та забезпечення комфортних умов повинен здійснюватися комплексно. У зв'язку із впровадженням нормативних документів, що стосуються енергоефективності та теплового комфорту [1,2,3], що відповідають європейським стандартам, важливим є врахування комплексу комфортних умов для будівель на стадії проектування та реновації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій Теплові умови комфортності в будівлі визначаються параметрами оточуючого середовища (температура повітря, середня радіаційна температура, відносна швидкість повітря і тиск пари в навколишньому повітрі) та людськими факторами (рівень активності й термічний опір одягу) [4]. Особливу увагу умовам комфортності приділяють вчені, що досліджують системи радіаційного опалення [5].

Українськими науковцями представлена нечітка модель комфортного повітряного середовища в житловому приміщенні, на основі якої вихідні комфортні значення температури внутрішнього повітря та відносної вологості формуються із врахуванням індивідуальних характеристик людини [6]. Комфортну швидкість руху повітря, як вихідну величину

для систем кондиціонування повітря, представлено у наступній роботі [7]. Показано вплив температурних параметрів комфортності на інтегровану вартість опалення [8, 9].

Для визначення комфортних умов у приміщенні використовують наступні моделі [10]: 1) модель PMV (Predicted Mean Vote) передбачає зв'язок між оптимальними тепловими умовами, використовуючи рівняння теплового балансу для людського тіла для стаціонарних умов і рейтинг забезпечення теплового комфорту; 2) адаптивна модель; співвідношення для стаціонарного теплового комфорту отримується на основі низки досліджень. Така модель представлена співвідношенням, між температурою повітря у приміщенні та температурою зовнішнього середовища; 3) НВх (human body exergy consumption) – метод визначає мінімальну величину споживання ексергії людським тілом, що відповідає комфортним умовам.

Системному розгляду впливу рівня теплового захисту як огорожувальних конструкцій будівлі, так і одягу та активності людини на показники комфортності приділяється мало уваги, хоча суттєве зниження рівня витрат на опалення, навіть із погіршенням комфортності, розглядається як вкрай необхідний захід при обмежених умовах енергозабезпечення в Україні.

Ексергетичний підхід до моделі теплового комфорту людини представлений у наступних роботах і в останній час отримав широке застосування [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Отже існує необхідність визначити в комплексі вплив різних факторів зі сторони людини та будівлі на тепловий комфорт людини.

Визначення мети та задачі дослідження: Метою дослідження є визначення показників теплового комфорту, а саме прогнозованого проценту незадоволених температурним середовищем

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

(*PPD*) для будівлі із різними характеристиками теплового захисту та для людини вдягненої у літній та зимовий одяг.

Основна частина дослідження

Для визначення та дослідження показників комфорту оберемо модель дослідження – віртуальну кімнату, характеристики якої, занесені у табл.1, а

Таблиця 1. Віртуальна модель кімнати

Характеристики	Приклад А	Приклад Б	Приклад С
Площа кімнати	4×4×2,5		
Площа вікна	1,5×2,5		
Тип теплового захисту огорожуючих конструкцій	Відповідає нормам 80-их років	Відповідає сучасним нормам	Норми покращені на 30 %
Швидкість руху повітря, м/с	0,1		
Температура повітря в кімнаті $t_{vn}, ^\circ C$	20		
Відносна вологість, %	50		
Швидкість руху повітря, $\frac{m}{c}$	0,1		
Температура зовнішнього повітря $t_z, ^\circ C$	- 1,1		

Таблиця 2. Віртуальна модель людини

Характеристики	Приклад 1	Приклад 2
Швидкість обміну речовин $M, \frac{Wt}{m^2}$	58	
Коефіцієнт теплоізоляції одягу $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Wt}$	0,155 (1)	0,0775 (0,5)

Тепловий комфорт оцінюється за наступними показниками [2]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-2,1 \cdot M} + 0,028) \cdot [(M - W) - H - E_c - C_{res} - E_{res}] \quad (1)$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (2)$$

де *PMV* – прогнозована середня оцінка якості внутрішнього середовища; *PPD* – прогнозований процент незадоволених температурним середовищем; *M* - ступінь метаболізму Вт/м²; *W* - ефективна механічна робота Вт/м²; *H* - втрати тепла теплопередачею; *E_c* - теплообмін шляхом випаровування зі шкіри;

також віртуальну модель людини (табл.2). Для аналізу обрано два варіанти одягу – зимовий і літній. Класичним літнім одягом є легкі штани, сорочка на короткий рукав і світла білизна (термічний опір 0,5 clo), а зимовим – бізнес костюм (термічний опір 1 clo) [4].

C_{res} - теплообмін конвекцією, під час дихання; *E_{res}* - теплообмін випаровуванням під час дихання.

Для визначення середньої радіаційної температури приміщення існує кілька методів: 1) метод, що враховує площу та температуру огорожуючих конструкцій [19]; 2) визначення рівневої радіаційної температури – для різного положення тіла

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

людини [20]; 3) враховується геометричний зв'язок людини зі всіма поверхнями [21]; 4) метод, що враховує зв'язок людини із

кожною поверхнею та надходження сонячної радіації [22]. Середня радіаційна температура визначається так [19]:

$$t_R = \frac{\sum_{i=1}^n F_i t_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3)$$

де F_i - площа огорожуючої конструкції; t_i - температура огорожуючої

конструкції; n - кількість огорожуючих конструкцій; Температура i -ї зовнішньої огорожуючої конструкції визначається так:

$$t_i = t_{vn} - \frac{t_{vn} - t_z}{R_{ok} \cdot \alpha_v} \quad (4)$$

де t_{vn} - температура повітря в кімнаті, $^{\circ}C$; t_z - температура зовнішнього повітря (в даній роботі розрахунки проводимо для найнижчої температури $= -1,1^{\circ}C$); R_{ok} - термічний опір огорожуючої конструкції, $\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{Wm}$; α_v - коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкцій [23]. Температура інших огорожуючих конструкцій приймається рівною температурі повітря в кімнаті t_{vn} .

визначена радіаційна температура у приміщенні t_R . Потім за допомогою програми [24] та даних із табл. 1 та 2, розраховано прогнозований процент незадоволених температурним середовищем PPD . Результати розрахунків представлені на рис.2. Оскільки для усіх варіантів огорожуючих конструкцій $PDD > 15$, то обрану віртуальну модель кімнати можна віднести до IV категорії за якістю теплового середовища [1]. Тому потрібно підвищувати температуру внутрішнього повітря, радіаційну температуру для покращення умов перебування. Зростання термічного опору огорожуючих конструкцій зменшує відсоток незадоволених температурним середовищем від 29% до 23% – при одній зовнішній стіні і від 31,4% до 23,4% – при двох зовнішніх стінах.

Розрахунок показників теплового комфорту можна здійснювати за допомогою різних програм [24, 25]. Програма для розрахунку представлена на рис. 1, яку обрано за вищу точність розрахунків.

Для обраної моделі кімнати за допомогою співвідношень (3) та (4)

Calculation of PMV and PPD

58	M (W/m2), Metabolic energy production (58 to 232 W/m2)
0	W (W/m2), Rate of mechanical work, (normally 0)
20	Ta (C), Ambient air temperature (10-30)
22	Tr (C), Mean radiant temperature (often close to ambient air temperature)
0.1	v (m/s), Relative air velocity (0.1 to 1 m/s)
50	rh (%), Relative humidity
1.0	Icl (clo), basic clothing insulation (1 clo = 0.155 W/m2K)

PMV and PPD

PMV -3 cold to +3 hot

PPD (%)

CALCULATION READY!

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Рис. 1 Програма для розрахунку прогнозованої середньої оцінки якості внутрішнього середовища (*PMV*) та прогнозованого проценту незадоволених температурним середовищем (*PPD*)

Оскільки найвищий процент теплового захисту огорожуючих конструкцій та підвищення термічного опору одягу зменшує *PPD*. Тому доцільно визначити чутливість функції *PPD* до зазначених факторів.

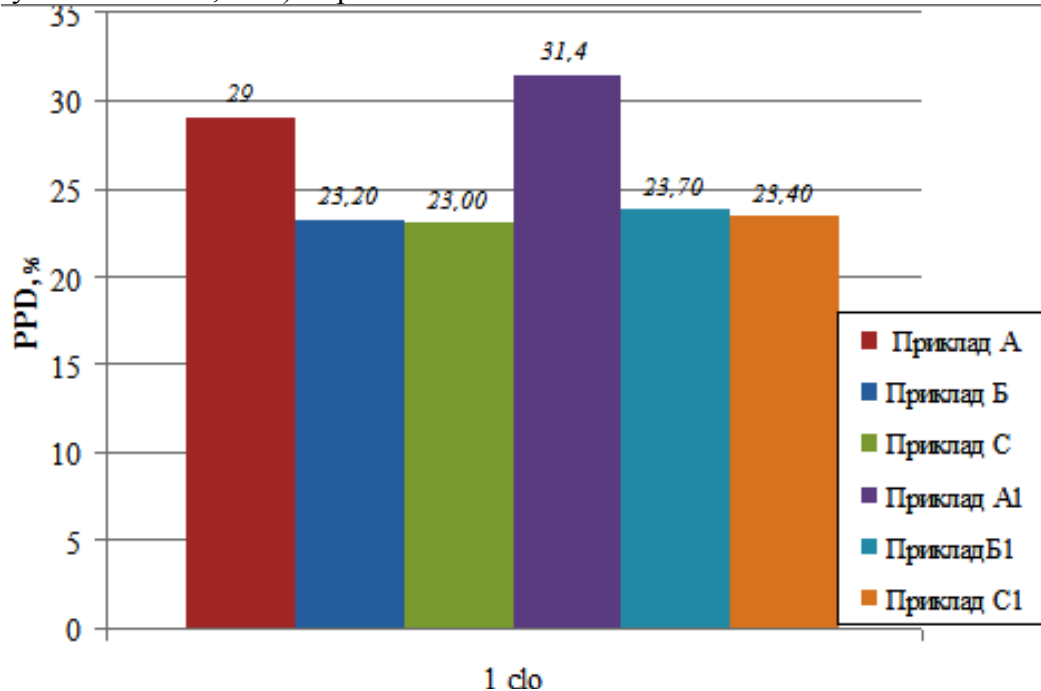


Рис.2. Значення *PPD* для віртуальної моделі кімнати

	Віртуальна модель кімнати з однією зовнішньою стіною		Віртуальна модель кімнати із двома зовнішніми стінами

Чутливість *PPD* до теплового захисту огорожуючих конструкцій та до

термічного опору одягу людини визначалась так:

$$\Omega = \frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (5)$$

де Ω – чутливість функції; y – функція, чутливість якої визначається; x – параметр, до якого визначається чутливість функції; x_0 – початкове значення аргументу; y_0 – початкове значення функції.

рівна $-1,1 \text{ }^\circ\text{C}$; 3) температура внутрішнього повітря $t_{vn} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; 4) швидкість обміну речовин $M = 58 \frac{\text{Bm}}{\text{m}^2}$. Отже найвища

Значення чутливостей функції *PPD* (проценту незадоволених температурним середовищем) представлені у таблиці 3. Для таких базових параметрів моделі: 1) тепловий захист будівлі відповідає нормам 80-х; 2) температура зовнішнього повітря

чутливість функції до температури внутрішнього повітря: від $-6,2$ до $-6,8$. Значний вплив на *PPD* має і радіаційна температура від $-3,29$ до $-3,46$, далі – обмін речовин від $-3,14$ до $-3,42$. Чутливість до теплоізоляції одягу є меншою від $-0,68$ до $-0,74$ і зі зростанням теплового захисту

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

огороджуючих конструкцій чутливість зростає. Ще менший вплив має тепловий захист будівлі від -0,08 – -0,11, та температура зовнішнього повітря -0,011 – -0,013. Від’ємне значення чутливостей

означає, що підвищення значення всіх показників, приводить до зниження відсотка незадоволених температурним середовищем, а отже і до покращення відчуття теплового комфорту людиною.

Таблиця 3. Значення чутливості *PPD*

Фактор	Коефіцієнт теплоізоляції одягу			Тепловий захист будівлі	$t_{m}, ^\circ C$			$t_z, ^\circ C$	Обмін речовин $M, \text{Вт/м}^2$	$t_R, ^\circ C$
	Пр. А	Пр. Б	Пр. С		Пр. А	Пр. Б	Пр. С			
Чутливість <i>PPD</i> моделі										
З однією зовнішньою стіною	-0,69	-0,74	-0,74	-0,08	-6,41	-6,79	-6,8	-0,014	-3,14	-3,46
З двома зовнішніми стінами	-0,68	-0,73	-0,74	-0,11	-6,2	-6,73	-6,78	-0,011	-3,42	-3,29

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.

В роботі проведено аналіз забезпечення комфортності в залежності від рівня таких факторів, як тепловий захист огорожувальних конструкцій будівлі і одягу людини. Представлена методика розрахунку, побудована на показниках теплового комфорту PMV та PPD, дозволяє встановити сукупність цих та інших факторів, що забезпечує потрібний рівень комфортності.

Показано, що для розглянутих умов степінь чутливості умов комфортності до різних параметрів моделі послідовно зменшується в ряду: температура внутрішнього повітря, середня радіаційна температура, швидкість обміну речовин, теплоізоляція одягу, тепловий захист будівлі, температура зовнішнього повітря.

При цьому треба враховувати можливий діапазон зміни цих величин. При низькому рівні теплового захисту огорожень вплив його зміни на умови комфортності зростає.

Проектування будівель із температурою внутрішнього повітря $20^\circ C$ - не відповідає умовам комфортності, тому потрібно підвищувати температуру внутрішнього повітря, або підвищувати середньозважену радіаційну температуру, використовуючи відповідні системи опалення.

Розглянуті підходи в подальшому будуть використані при аналізі умов оптимізації енерго-економічних показників проектування та експлуатації будівлі для системи джерело енергії – будівля – людина. А також подальші дослідження полягатимуть у врахуванні впливу сонячної радіації на середньозважену радіаційну температуру та на показники комфорту.

Список використаних джерел

1. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель (EN 15251:2007, IDT): ДСТУ Б EN 15251: 2011. – [чинний від 01.01.2013]. – К.: - Мінрегіон України, 2012. – 33 с. (Національний стандарт України).

2. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2011, IDT): ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. – [чинний від 01.07.2013]. – К.: - Мінрегіон України, 2012. – 64 с. (Національний стандарт України).
3. Енергоефективність будівель. Загальне енергоспоживання та визначення енергетичних показників (EN 15603:2012): ДСТУ Б EN 15603: 2012. – [чинний від 01.01.2014]. – К.: - Мінрегіон України, 2012. – 43 с. (Національний стандарт України).
4. Fanger P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice // *British Journal of Industrial Medicine*. – 1973. – №30. – С. 313–324.
5. Шиванов В. В. Обеспечение теплового режима производственных помещений системами газового лучистого отопления : дис. канд.: 05.23.03 — Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение / Шиванов В. В. – Нижний Новгород, 2007. – 134 с.
6. Бабич Н.И. Нечеткая модель оценки комфортных условий при проектировании систем кондиционирования воздуха // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2013. – № 64. – С. 36-40.
7. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини / О. Т. Возняк // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. – 2010. – № 662 : Теорія і практика будівництва. – С. 84–88. .
8. Дешко В. И. Влияние комфортных условий на интегрированную стоимость отопления / В. И. Дешко, Н. А. Буяк. // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – №7. – С. 63–64.
9. Дешко В. И. Показники опалення будівель і температурні умови комфортності / В. И. Дешко, Н. А. Буяк. // *Промышленная теплотехника*. – 2010. – №1. – С. 66–70.
10. Schweiker M. Adaptive comfort from the viewpoint of human body exergy consumption. / M. Schweiker, M. Shukuya. // *Building and Environment*. – 2012. –V. 51. – P. 351–360.
11. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort / M. Prek. // *International Journal of Exergy*. – 2004. – V. 1. –P. 303–315.
12. [Electronic Resource]. –Mode of access: URL: http://www.annex49.info/download/Annex49_HBE.pdf. – Title from screen.
13. A relation between calculated human body exergy consumption rate and subjectively assessed thermal sensation / [A. Simone, J. Kolarik, T. Iwamatsu та ін.]. // *Energy and Buildings*. – 2011. – V. 43. – P. 1–9.
14. Juusela M. A. Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland / M. A. Juusela, M. Shukuya. // *Energy and Buildings*. – 2014. – №76. – P. 249–257
15. Baldi M. G. Thermal Exergy Analysis of a Building / M. G. Baldi, L. Leoncini. // *Energy Procedia*. – 2014. – V. 62. – P. 723–732.
16. A novel human body exergy consumption formula to determine indoor thermal conditions for optimal human performance in office buildings / X.Wu, J. Zhao, B. W. Olesen, L. Fang. // *Energy and Buildings*. – 2013. – V. 56. – P. 48–55.
17. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: Coupling with the indoor environment and thermal sensation. // *Building and Environment*. – 2013. – V. 59. – P. 10–22.
18. Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions / K. E.Keutenedjian Mady, M. S. Ferreira, J. I. Yanagihara, S. Oliveira. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2014. – V. 77. – P. 577–584.
19. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494: 1996. – [чинний від 01.03.1999]. –М.: – Межгосударственная научно-

техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве: 1999. –13 с. (Межгосударственный стандарт).

20. Ergonomics of the thermal environment–Instruments for measuring physical quantities: BS EN ISO 7726: 2001. – [Execute Date 2001/11/6]. - British Standards: 2001. – p. 62 (Adopted International Standard).

21. Fanger P. O. Thermal comfort / Fanger. – New-York: Mc Graw Hill book company, 1970.

22. Wai Leung Tse. A distributed sensor network for measurement of human thermal comfort feelings / Wai Leung Tse, Wai Lok Chan. // Sensors and Actuators. – 2008. –V. 144. – P. 394–402.

23. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2006.– [чинний від 01.01.2008]. – К.: - Міністерство Будівництва, Архітектури та Житлово-Комунального Господарства України, 2006. – 73 с. (Державні будівельні норми України).

24. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) [Electronic Resource]. –Mode of access: URL: http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html. – Title from screen.

25. CBE Thermal Comfort Tool [Electronic Resource]. –Mode of access: URL: <http://comfort.cbe.berkeley.edu>. – Title from screen.

Дешко Валерій Іванович д-р техн. наук, професор кафедри теплотехніки та енергозбереження (ІЕЕ) Національного технічного університету України «КПІ».

Буяк Надія Андріївна аспірант кафедри теплотехніки та енергозбереження (ІЕЕ) Національного технічного університету України «КПІ».

Deshko Valerij Ivanovich d-r science, professor department of Thermal Engineering and Energy Saving National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”.

Buyak Nadia Andriivna postgraduate department of Thermal Engineering and Energy Saving National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”.

Стаття прийнята 20.05.2015р

УДК 658.264

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОРАЙОННОЙ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ДВУХТРУБНОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ВОЗМОЖНОГО УТЕПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ

канд.техн.наук А.А. Алексахин, А.В. Бобловский

ОЦІНКА ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОРАЙОННОЇ ТЕПЛОВОЇ МЕРЕЖІ ПРИ ПЕРЕХОДІ ДО ДВОТРУБНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ МОЖЛИВОГО УТЕПЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ

канд.техн.наук О.О. Алексахін, О.В. Бобловський

EVALUATION OF CHANGES IN THE NEIGHBORHOOD CHARACTERISTICS OF THE HEAT NETWORK DURING THE TRANSITION TO TWO-PIPE HEATING SYSTEM WITH THE POSSIBILITY OF THERMAL INSULATION OF BUILDINGS

cand. of techn. sciences A.A.Aleksahin, A.V.Boblovskij

На примере групп зданий с одинаковыми тепловыми нагрузками, но разными характеристиками застройки проанализировано изменение тепловых потерь трубопроводами водяной системы теплоснабжения и расхода электроэнергии для

транспортирования воды по территории микрорайона при переходе от четырехтрубной схемы организации теплоснабжения к двухтрубной с учетом возможного утепления зданий . Полученные результаты могут быть полезны при разработке стратегии реформирования микрорайонной системы теплоснабжения

Ключевые слова: *централизованное теплоснабжение, микрорайонные тепловые сети, тепловые потери, энергосбережение, утепление зданий*

На прикладі груп будівель з однаковими тепловими навантаженнями, але різними характеристиками забудови проаналізовано зміну теплових втрат трубопроводами водяної мережі теплопостачання і витрат електроенергії для транспортування води територією микрорайону при переході від чотиритрубною схеми організації теплопостачання до двотрубною з урахуванням можливого утеплення будівель. Отримані результати можуть бути корисними при розробці стратегії реформування микрорайонної системи теплопостачання.

Ключові слова: *централизованное теплопостачання, микрорайонні теплові мережі, теплові втрати, енергозбереження, утеплення будівель*

On the example of an idealized group of residential buildings with the same teplovye downloads, but different characteristics of development the analysis of changes in Teplova loss water pipelines of heat supply system and conditional energy consumption for transportation of water by the district when replacing four pipe schemes of double-pipe heat supply. This transition provides a significant reduction of heat losses in networks. It is shown that the preliminary insulation of buildings, reducing the need for mains water for heating buildings, in some cases to perform this transition with the use of existing neighborhood heat network without their reconstruction. The magnitude of change neighborhood indicators systems heating depends on the thermal parameters of the network (length, diameter, method of laying, characteristic of the thermal insulation of pipelines), constructive features and the number of storeys of buildings. The results obtained can be useful in developing the strategy of reforming the micro-district heating system

Keywords: *district heating, micro-district heating networks, heat loss, energy saving, thermal insulation of buildings*

Введение

В работе рассматриваются вопросы функционирования централизованных систем теплоснабжения. Особенностью сложившихся систем теплоснабжения городов является наличие микрорайонных узлов управления режимами теплопотребления (центральные тепловые пункты ЦТП) с размещенными на них теплообменными аппаратами горячего водоснабжения. Наличие общей водогревательной установки в микрорайонной системе обуславливает четырехтрубную распределительную сеть и существенные потери теплоты при транспортировке. Замена традиционной четырехтрубной микрорайонной тепловой сети двухтрубной позволяет за счет уменьшения длины трубопроводов обеспечить снижение уровня тепловых потерь в сетях. Переход к двухтрубной системе теплоснабжения подразумевает размещение в зданиях водогревательных

установок горячего водоснабжения и может осуществляться либо с использованием существующей сети трубопроводов отопления для транспортирования возросших расходов сетевой воды, покрывающих потребность в теплоте и для отопления и для горячего водоснабжения; либо с реконструкцией сети с целью увеличения диаметров трубопроводов.

Анализ последних достижений и публикаций

Сравнение показателей перехода к двухтрубной системе теплоснабжения по названным схемам при неизменной отопительной нагрузке зданий микрорайона выполнено в [1], в которой показаны их положительные стороны и недостатки. Современный уровень развития строительной отрасли предоставляет широкий выбор материалов, конструкций и технологий, которые позволяют обеспечить необходимое термическое сопротивление

строительных конструкций и требуемый уровень тепловых потерь зданиями [2-4]. В работе [5] на основании данных о конструктивных характеристиках ряда типовых проектов функционирующих жилых зданий и современных нормативных требований к уровню сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций выполнены оценки снижения расхода теплоты системами отопления этих зданий. Отмечено, что снижение теплоснабжения при расчетной для отопления температуре наружного воздуха примерно составляет примерно 28-43%. Дополнительное утепление зданий обеспечивает снижение требуемого для отопления расхода сетевой воды и соответствующее снижение затрат на прокачивание теплоносителя по микрорайонным сетям.

Целью данной работы является оценка влияния дополнительной теплоизоляции зданий на гидравлические показатели двухтрубной микрорайонной сети и возможность реализации перехода к двухтрубной схеме теплоснабжения без реконструкции тепловой сети при незначительном увеличении потерь давления. Исследование выполнено расчетным путем на примере идеализированных групп зданий.

Основная часть исследования

Сравнение вариантов проведено на примере трех жилых групп с этажностью зданий 5, 9 и 16. Все здания каждой из групп имеют одинаковую этажность. Отопительные нагрузки микрорайонов и

число жителей примерно одинаковые. Расходы теплоты на горячее водоснабжение определены с учетом коэффициента часовой неравномерности потребления воды [6-8] в зависимости от принятого числа жителей. Основные характеристики рассмотренных групп зданий приведены в табл.1. Эффективность применения дополнительной теплоизоляции зданий учтена в расчетах коэффициентом μ , принятым равным 0,65 ($\mu=Q_{орн}/Q_{ор}$; $Q_{ор}$, $Q_{орн}$ – расчетные отопительные нагрузки зданий до и после утепления).

Расчеты выполнены в следующей последовательности. По совместной нагрузке отопления и горячего водоснабжения зданий найден расход теплоносителя, причем при нахождении диаметров использована максимальная нагрузка горячего водоснабжения зданий, при вычислении условного расхода электроэнергии для транспортировки воды по микрорайонной сети – среднесуточная. Теплотери трубопроводами сети рассчитаны отдельно для отопительного и летнего периодов по упрощенной методике [9], потери давления - по использованной в [10] методике при принятых линейных потерях давления $R=50$ Па/м. Потери давления в местных сопротивлениях учтены коэффициентом 0,3, потери теплоты в конструктивных элементах тепловой сети при прокладке в непроходных каналах – коэффициентом 1,15. Коэффициент полезного действия насосов принят 0,6. Результаты расчетов приведены в табл.3.

Табл.1. – Характеристики микрорайонов

Показатель	Вариант		
	1	2	3
Этажность жилых зданий	5	9	16
Длина трубопроводов, м:			
- общая	5320	3271	1938
- главной ветви	2120	1308	775
- ответвлений	3200	1963	1163
Число жителей	10010	10080	10050
Максимальный расход теплоты, МВт:			
-отопление (до утепления зданий)	15,69	15,80	15,74
-горячее водоснабжение	8,67	8,67	8,67
Количество жилых домов	36	20	22

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Табл.2. – Исходные данные для сравнения вариантов

Показатель	Обознач.	Значение
Температура наружного воздуха (средняя за отопительный период), °С	t_{cp}	-2,1
Температура сетевой воды: -подающая линия, °С	T_n	85
-обратная линия, °С	t_o	49
Температура горячей воды: -подающая линия, °С	t_2	60
-циркуляционная линия, °С	t_4	45
Температура грунта на глубине заложения сети (отопительный период/ летний период)	t_{gp}	5,0/8,5
Длительность периода (отопительный / летний), суток	$T_{он}/T_{л}$	190/160

Табл.3. – Параметры двухтрубной системы теплоснабжения жилых групп с учетом возможного утепления зданий

Показатель	Вариант		
	1	2	3
Средний диаметр отопительной сети, м:			
-главная ветвь	0,175	0,179	0,178
-сеть в целом	0,104	0,114	0,112
Материальная характеристика M_2 , м ²	1107	746	434
Отношение (M_2/M_4)*	0,53	0,525	0,526
Теплопотери сетью ΔQ_2 , ГДж/год	15869	10225	5998
Отношение $\Delta Q_2/\Delta Q_4$	0,75	0,747	0,747
Условный расход электроэнергии N_2 , кВт час/год	85884	103721	166520
Отношение N_2/N_4	0,91	0,96	1,1
Изменение условной мощности насосов $N_{н2}/N_{н4}$	0,95	0,97	1,2
Изменение требуемого напора H_2/H_4	0,99	1,0	1,06

*– Примечание: индекс «2» относится к показателям двухтрубной системы, индекс «4» - четырехтрубной.

Выводы

Анализ полученных данных показывает, что при переходе от четырехтрубной схемы организации теплоснабжения к двухтрубной при условии предварительного утепления зданий микрорайона максимальное увеличение требуемой условной мощности насосов для прокачивания теплоносителя по микрорайонной сети составило около 20% (расчетный вариант 3), увеличение годового расхода электроэнергии – около 10%. Предварительное утепление зданий позволяет для рассмотренных вариантов

условную мощность насосов и годовой расход электроэнергии уменьшить в зависимости от характеристик застройки примерно в 1,4-2,6 раза. В зависимости от характеристик застройки группы зданий и параметров сети в ряде случаев представляется возможным использовать существующие микрорайонные тепловые сети для реализации двухтрубной схемы теплоснабжения. Выбор варианта реформирования системы теплоснабжения необходимо выполнять с учетом особенностей конкретной жилой группы.

Список использованных источников

1. Алексахин А.А. Оценка изменения параметров микрорайонной тепловой сети при переходе от четырехтрубной системы теплоснабжения к двухтрубной [Текст] / Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П. // Интегровані технології: 2015, №1, с.32-36

2. Техническая теплофизика ограждающих конструкций зданий и сооружений [Текст] / В.А.Маляренко, А.Ф. Редько, Ю.И. Чайка, В.Б. Поволочко. – Х.: Рубикон, 2001. – 280 с.
3. Маляренко В.А. Основы теплофизики будівель та енергозбереження [Текст] / В.А.Маляренко.- Харків: «Вид.САГА»,2006.-484 с
4. Савйовский В.В. Ремонт и реконструкция гражданских зданий [Текст] / В.В. Савйовский, О.Н.Болотских. – Харьков: Ватерпас, 1999.-288с.
- 5.Алексахин А.А. Оценка энергосберегающего потенциала функционирующих жилых зданий [Текст] / Алексахин А.А., Бобловский А.В. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. –2012. –№1. –С. 10–14.
- 6.Повышение зффективности работы систем горячего водоснабжения [Текст] / Н.Н.Чистяков, М.М.Грудзинский, В.И.Ливчак и др. - М.: Стройиздат, 1982. - 314 с.
- 7.Повышение зффективности работы тепловых пунктов [Текст] / Н.М.Зингер, В.Г.Бестолченко, А.А.Жидков.- М: Стройиздат,1990.-185с.
- 8.Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем [Текст] / Н.М.Зингер.- М.:Энергоиздат,1986.-320с.
- 9.Алексахін О.О. Обчислення втрат теплоти у мікрорайонних теплових мережах [Текст]/ О.О. Алексахін // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.-К. «Техніка»,2014.- Вип.114, с.82-84.
- 10.Алексахін О.О. Втрати тиску у мікрорайонних теплових мережах [Текст]/ О.О. Алексахін, О.В.Бобловський // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб.-К. «Техніка»,2014.-Вип.114, с.85-87.

Рецензент: д-р техн. наук, професор Маляренко В.А

Алексахін Олександр Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри теплотехніки та теплових двигунів Харківський державний університет залізничного транспорту. тел. (057) 730-10-77

Бобловський Олександр Володимирович, асистент кафедри теплохолодопостачання Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. тел. (099) 530-59-06. E-mail: boblovskey@yandex.ua

Aleksahin Alexander Alekseevich, cand. of techn. sciences, associate professor in the department of thermal engineering and heat engines Kharkiv State University of Railway Transport. tel: (057) 730-10-77

Boblovskij Alexander Vladimirovich, assistant in the department of heating and cooling supplies Kharkov National Academy of Municipal Economy. tel (099) 530-59-06. E-mail: boblovskey@yandex.ua

Стаття прийнята 20.04.2015р

УДК 69.01

ОЦЕНКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХСЛОЙНЫХ СЭНДВИЧ-ПАНЕЛЕЙ СЕРИИ «АЛЮТЕРМ»

Канд. техн. наук Л.В.Гапонова, аспиr. Е.А.Петрова

ОЦІНКА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИШАРОВИХ СЕНДВІЧ-ПАНЕЛЕЙ СЕРІЇ «АЛЮТЕРМ»

Канд. техн. наук Л.В.Гапонова, аспиr. О.О.Петрова

THE EVALUATION OF THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF SANDWICH-PANELS OF «ALUTERM» SERIES

PhD, docent L.V. Gaponova, graduate student E.A. Petrova

В статье рассмотрены вопросы определения теплофизических показателей трехслойных сэндвич-панелей с двумя типами заполнителя. Обозначены особенности поведения ограждающих конструкций в виде сэндвич-панелей с армирующими элементами

из просечно-вытяжного листа при различных температурных режимах. Приведено конструктивное решение сэндвич-панели, позволяющее избежать появления зон локального промерзания панелей в местах примыкания армирующих элементов к наружной обшивке.

Ключевые слова. Трехслойная сэндвич-панель, армирующие элементы, термическое сопротивление, «мостик холода», конечно-элементное моделирование, просечно-вытяжной лист (ПВЛ).

У статті розглянуто питання визначення теплофізичних показників тришарових сендвіч-панелей з двома типами заповнювача. Позначено особливості поведінки огороджувальних конструкцій у вигляді сендвіч-панелей з армуючими елементами з просічно-витажного листа при різних температурних режимах. Наведено конструктивне рішення сендвіч-панелі, що дозволяє уникнути появи зон локального промерзання панелей в місцях примикання армуючих елементів до зовнішньої обшивки.

Ключові слова. Тришарова сендвіч-панель, армуючі елементи, термічний опір, «місток холоду», скінченно-елементне моделювання, просічно-витажний лист (ПВЛ).

The questions of determination of thermophysical characteristics of sandwich panels with two types of fillers – polystyrene and mineral wool fibre – are discussed in paper. The peculiarities of the behavior of enclosure structures in the form of sandwich panels with reinforcing elements made of expanded metal under the different temperature modes are highlighted. The results of the calculation of the considered designs of sandwich panels in the software package based on the finite element method are shown. The constructive solutions of sandwich panel allowing avoid the areas of local freezing of sandwich panel at the places of junction of reinforcing elements and outer face of the panel are given. The thermophysical analysis of the new constructive solution of sandwich panel with reinforced elements and polystyrene liner is also marked in the paper.

Keywords. Sandwich panels, reinforced elements, thermal resistance, "bridges of cold", finite element modeling, expanded metal.

Введение. В настоящее время в практике отечественного и мирового строительства большое распространение получили многослойные ограждающие конструкции [1]. К ним, в первую очередь, следует отнести трехслойные сэндвич-панели с металлическими наружными обшивками и средним слоем из минераловатных плит или пенополистирольного заполнителя. Панели типа сэндвич являются ярким примером современных облегченных конструкций [2], которые в сравнении с традиционными кирпичными или железобетонными стенами обладают существенно меньшим весом, обеспечивают высокий уровень звукоизоляции и эксплуатационной надежности, а трудозатраты на их изготовление, транспортировку и монтаж являются минимальными.

Кроме того, отличительной особенностью трехслойных панелей от однослойных является возможность обеспечения требуемого термического

сопротивления в результате применения легкого высокоэффективного утеплителя. Так, например, сэндвич-панель толщиной 100 мм способна обеспечить такой же уровень теплоизоляции как кирпичная стена толщиной 640 мм или стена из пенобетонных блоков толщиной 500 мм. Данное обстоятельство определяет широкое применение трехслойных сэндвич-панелей при строительстве складских и холодильных помещений, промышленных зданий и прочих быстромонтируемых зданий с определенным температурным режимом.

В настоящее время достаточное количество работ посвящены именно вопросам исследования работы трехслойных сэндвич-панелей с различными видами заполнителей [3, 4]. Авторами данной работы ранее были изучены особенности напряженно-деформированного состояния и деформирования как обычных сэндвич-панелей [5], так и конструкций, усиленных армирующими вставками из просечно-вытяжного листа (ПВЛ) [6]. Необходимость

исследования теплофизических характеристик указанных конструктивов предопределило теоретическое их исследование на базе метода конечно-элементного моделирования.

Конструктивные особенности.

Рассматриваемая в работе трехслойная сэндвич-панель серии «Алютерм» представляет собой конструкцию, которая состоит из двух металлических обшивок (листовая оцинкованная сталь с полимерным покрытием) и легкого заполнителя – пенополистирола либо минеральной ваты на основе базальтового волокна. Модульная ширина панели составляет 1000 мм, а толщина внешних металлических обшивок 0,5 мм. Непрерывная технология изготовления сэндвич-панелей серии «Алютерм» позволяет выпускать панели любой заранее заданной длины, однако, в рамках данного исследования этот параметр носил второстепенный характер. Для оценки теплофизических особенностей рассматриваемых панелей «Алютерм» из существующей номенклатуры были выбраны

следующие параметры толщины сэндвич-панели: 100 мм, 120 мм, 150 мм, 200 мм.

В работе были рассмотрены три типа панелей с двумя видами заполнителя – минеральной ватой и пенополистиролом. При этом средний изоляционный слой состоит из отдельных ламелей – полос утеплителя шириной 100мм, высотой равной толщине панели и произвольной длины. Первый тип сэндвич-панели (рис. 1а) представляет собой обычную трехслойную панель с пенополистирольным или минераловатным заполнителем. Для второго и третьего типов характерно использование армирующих вставок из просечно-вытяжного листа толщиной 0,5мм, которые устанавливаются между ламелями утеплителя. Во втором типе сэндвич-панели (рис. 1б) армирующая вставка имеет вид плоской продольной полосы, тогда как в третьем типе (рис. 1в) – это объемный лонжерон, горизонтальные грани которого равны 100 мм, а вертикальные равны высоте панели. Поперечное сечение рассматриваемых трех типов конструкций приведены на рис. 1.

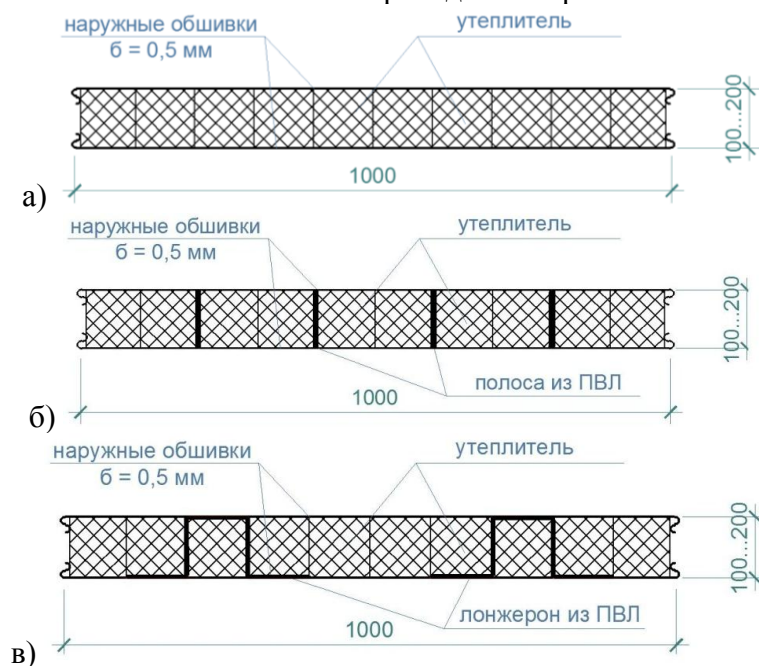


Рис. 1. Поперечное сечение рассматриваемых сэндвич-панелей: а) традиционной; б) с армирующей полосой из ПВХ; в) с армирующим лонжероном из ПВХ.

Основные определения.

Цель исследования: установление путем конечно-элементного моделирования

характера распределения температур по толщине сэндвич-панелей серии «Алютерм», их теплофизических характеристик, а также

оценка влияния на данные показатели наличия армирующих элементов.

Объект исследования: трехслойные сэндвич-панели серии «Алютерм» с минераловатным и пенополистирольным заполнителями, а также армирующими элементами из просечно-вытяжного листа.

Предмет исследования: характер распределения температур по толщине сэндвич-панели, а также оценка влияния армирующих вставок на теплофизические характеристики панели в целом.

Определение теплофизических характеристик сэндвич-панелей. Основным направлением повышения эффективности конструкций является разработка легких теплогидроизоляционных материалов. Этим определяется актуальность настоящей работы. На термическое сопротивление конструкции влияют следующие характеристики: геометрические, отражающие размеры и форму элементов

$$t_x = t_g - \frac{t_g - t_n}{R_0} (R_g + \sum R_x) \quad (1)$$

где t_g – температура внутреннего воздуха помещения, °C;

t_n – температура наружного воздуха, °C;

R_0 – термическое сопротивление ограждения, м² К/Вт;

R_g – термическое сопротивление теплоотдаче на внутренней поверхности ограждения, м² К/Вт;

где s_1 , s_3 – коэффициент теплоусвоения металлических наружных обшивок в расчетных условиях эксплуатации, [Вт/(м²К)]; s_2 – коэффициент теплоусвоения утеплителя из ламелей минеральной ваты или пенополистирола, [Вт/(м²К)].

конструкции; физические и механические характеристики материалов (теплопроводность, коэффициент теплопроводности); граничные условия, отражающие характер взаимодействия с окружающей средой. Климатические факторы также существенно влияют как на изменение температуры и влажности ограждающих конструкций, так и на температурно-влажностный режим помещения [7].

Для рассматриваемых конструкций трехслойных сэндвич-панелей различной толщины (без учета армирующих элементов) был проведен анализ теплофизических характеристик в плоской задаче.

Определение температур на границах слоев ограждения выполнялось согласно формуле (1):

$\sum R_x$ – сумма термических сопротивлений слоев от внутренней поверхности конструкции до рассматриваемого сечения, м² К/Вт.

Расчет тепловой инерции многослойной ограждающей конструкции выполнялся согласно формуле (2):

$$D = R_1 \cdot s_1 + R_2 \cdot s_2 + R_3 \cdot s_3 \quad (2)$$

Полученные значения термического сопротивления конструкции и ее тепловой инерции и графики распределения температур в поперечном сечении конструкции для панелей с минераловатным и пенополистирольным заполнителем различной толщины приведены в таблицах 1 и 2.

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Таблица 1. Теплофизические характеристики сэндвич-панелей с пенополистирольным средним слоем

№ п/п	Толщина панели, мм	R, м ² К/Вт	D	График распределения температуры по панели
1	δ=100	2,66	0,9	
2	δ=120	3,16	1,07	
3	δ=150	3,91	1,33	
4	δ=200	5,16	1,75	

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Таблица 2. Теплофизические характеристики сэндвич-панелей с минераловатным средним слоем

№ п/п	Толщина панели, мм	R, м ² К/Вт	D	График распределения температуры по панели
1	δ=100	2,16	1,03	
2	δ=120	2,56	1,23	
3	δ=150	3,16	1,52	
4	δ=200	4,16	1,99	

Анализируя полученное термическое сопротивление панелей, приведенное в таблицах 1 и 2, в соответствии с ДБН [8], можно сделать вывод о том, что в качестве внешних стен жилых и гражданских зданий могут использоваться следующие сэндвич-панели серии «Алютерм»:

- в I-й температурной зоне Украины: с пенополистирольным наполнителем – толщиной не

менее 150 мм, с минераловатным наполнителем – толщиной не менее 200 мм;

- во II-й температурной зоне Украины: с пенополистирольным наполнителем – толщиной не менее 120 мм, с минераловатным наполнителем – толщиной не менее 150 мм;

В качестве внешних стен промышленных зданий допустимо использование сэндвич-панелей серии «Алютерм» с минераловатным наполнителем толщиной не менее 120 мм или с пенополистирольным наполнителем толщиной не менее 100 мм.

Решение задачи теплофизики в конечно-элементной форме. Конструктивное армирование в виде плоских полос и объемных лонжеронов из просечно-вытяжного листа, применяемое в рассматриваемых сэндвич-панелях «Алютерм», образует так называемый «мостик холода», по которому осуществляется сток тепла, что следует обязательно учитывать при создании новых конструкций облегченного типа.

Для решения поставленной задачи использовался сертифицированный программный комплекс Autodesk Simulation Mechanical [9], базирующийся на методе конечных элементов (МКЭ). При имитационном моделировании сэндвич-панелей в конечно-элементной форме использованы физико-механические характеристики материалов и геометрические параметры панелей, которые полностью отвечают действительным параметрам изучаемых конструкций. Конечно-элементные модели рассматриваемых сэндвич-панелей и фрагментов армирования приведены на рис. 2.

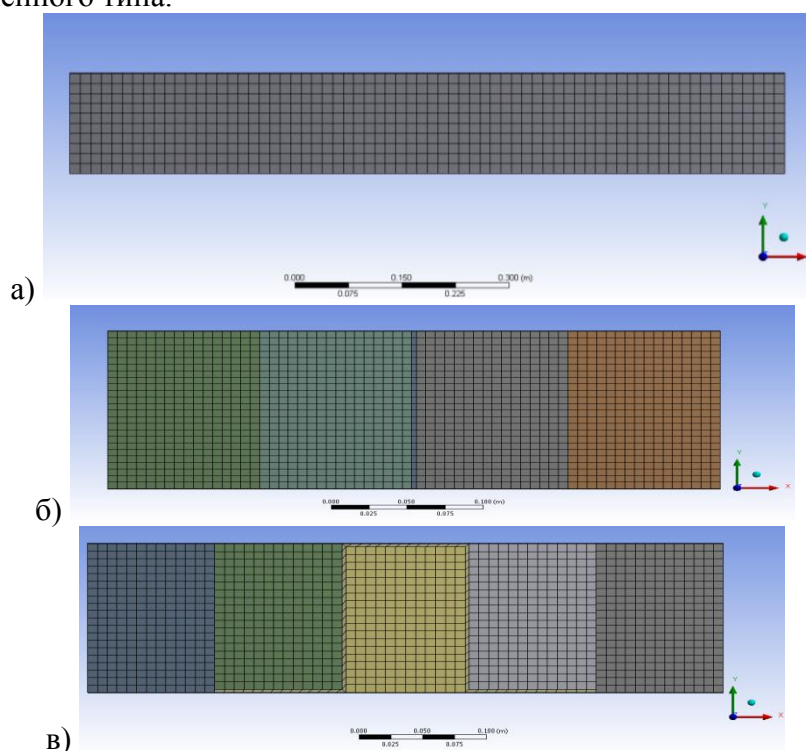


Рис. 2. Конечно-элементные модели: а) панели в целом; б) фрагмента панели с плоской полосой из ПВЛ, в) фрагмента панели с лонжероном из ПВЛ.

Граничные условия для расчета принимались в следующем виде. Расчетная температура внутреннего воздуха $t_{в}^p = 22^{\circ}\text{C}$; расчетная температура наружного воздуха $t_{н}^p = -23^{\circ}\text{C}$; расчетный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности $\alpha_{в}^{cm} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; расчетный коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности $\alpha_{н} = 23,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Для поверхностей, ограничивающих расчетную область,

тепловой поток и коэффициенты теплоотдачи принимались равными нулю. Начальная температура всей конструкции принималась равной 20°C .

В общем случае для решения поставленной задачи необходима реализация нелинейной задачи нестационарной теплопроводности [10]. Тогда для какой-либо конкретной конфигурации области

объемом V необходимо решить уравнение нестационарной теплопроводности вида:

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \operatorname{div}(a \cdot \operatorname{grad} T) + Q, \quad x \in V, \quad \tau > 0, \quad (3)$$

где $T(\bar{x}, \tau)$ – искомая функция теплопроводность; c – удельная температуры; \bar{x} – вектор координат; τ – теплоемкость; ρ – плотность; Q – время; $a = \lambda / (c\rho)$ – внутренний источник или сток тепла. Начальное условие задачи:

$$T(\bar{x}, 0) = T_0(\bar{x}), \quad (4)$$

где $T_0(\bar{x})$ – заданная функция.

Граничные условия задачи (3) в общем случае имеют вид:

$$\alpha^* \frac{\partial T}{\partial \bar{x}} + \beta^* T = f(\bar{x}, \tau), \quad \bar{x} \in \bar{x}_{cp}, \quad (5)$$

где α^* , β^* – константы; $f(\bar{x}, \tau)$ – различными для разных участков заданная функция; \bar{x}_{cp} – вектор, описывающий границу области.

Для тепловых задач условие (5) называется условием первого рода при $\alpha^* = 0$, условием второго рода при $\beta^* = 0$ и условием третьего рода при $\alpha^* \neq 0$ и $\beta^* \neq 0$. Константы α^* и β^* , а также функция $f(\bar{x}, \tau)$ могут быть

различными для разных участков поверхности, ограничивающей исследуемый объем. Конкретный вид выражения (5), если принять, что \bar{x}_{cp} образуется поверхностями S_1 , где заданы граничные условия первого рода, S_2 – второго, S_3 – третьего, можно записать так:

$$\begin{aligned} T(x, \tau) &= T(\bar{x}, \tau), & (\bar{x}, \tau) \in S_1, \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= q(\bar{x}, \tau), & (\bar{x}, \tau) \in S_2, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= -\alpha(T - T_c), & (\bar{x}, \tau) \in S_3. \end{aligned}$$

Здесь T и q – температура и тепловой поток, заданные соответственно на частях границы поверхности S_1 и S_2 тела; α – коэффициент теплоотдачи через поверхность тела S_3 от среды с температурой T_c ; n – внешняя нормаль к поверхности. Объединение участков S_1 , S_2 и S_3 образует полную границу S объема V . Частный случай $q=0$ второго условия отражает отсутствие переноса тепла – адиабатическую границу.

Граничных условий (5) и их комбинация охватывают весь класс встречающихся на практике задач, так как теплообмен излучением можно свести к задаче конвективного теплообмена – граничным условиям третьего рода.

С вариационной точки зрения, что очень удобно для практической реализации МКЭ, решение уравнения (3) с граничными условиями (5) эквивалентно отысканию минимума функционала вида:

$$I(T) = \int_V \frac{1}{2} \left\{ (\lambda \cdot \operatorname{div} \operatorname{grad} T) - 2 \left(Q - c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) T \right\} dV + \int_{S_2} q T dS + \int_{S_3} \frac{\alpha}{2} [T^2 - 2T \cdot T_c + T_c^2] dS \quad (6)$$

При этом полагается, что минимизация осуществляется для каждой точки временного интервала и перед каждой такой минимизацией теплофизические характеристики и другие величины,

зависящие от времени, должны быть пересчитаны заново. При минимизации функционала (6) также принимается, что граничные условия первого рода на поверхности S_1 – наложены на пробную

функцию $\{\bar{T}\}$ – значения узловых температур в МКЭ.

Итоговое разрешающее уравнение МКЭ имеет вид:

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta\tau} [C] \right) \{\bar{T}\}_1 = \left(\frac{2}{\Delta\tau} [C] - [K] \right) \{\bar{T}\}_0 - 2\{F\}^* \quad (7)$$

где $[K]$ – матрица теплопроводности конечных элементов; $[C]$ – матрица теплоемкости; $\Delta\tau$ – временной интервал; $\{\bar{T}\}^* = \frac{1}{2} (\{\bar{T}\}_1 + \{\bar{T}\}_0)$; $\{F\}^* = \frac{1}{2} (\{F\}_1 + \{F\}_0)$.

Здесь T_0 и T_1 – функции температуры для времени τ_0 и τ_1 соответственно. Аналогично для функции $\{F\}$ – термических сил. В расчетах используются расчетные значения температуры в узловых точках.

Сравнительный анализ изолиний температурных полей для рассматриваемых конструкций с утеплителем из

минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя толщиной 100 мм приведен в таблице 3. Следует отметить, что в рамках работы были рассмотрены также панели толщиной 120, 150 и 200 мм, однако, характер распределения температур по панели, толщиной отменной от 100 мм, практически аналогичен и отличие температур на внешней и внутренней сторонах ограждающей конструкции для них указанных случаев также незначительно.

Таблица 3. Изолинии температурных полей для сэндвич-панели толщиной 100мм

Вид	Заполнитель - пенополистирол	Заполнитель - минеральная вата
Традиционная панель		
Панель с полосой из ПВЛ		
Панель с лонжероном из ПВЛ		

При рассмотрении структуры конструкции следует отметить её неоднородность с точки зрения теплозащитных свойств используемых конструкционных материалов. Анализ расположения армирующих элементов в трехслойных панелях с металлическими наружными обшивками и утеплителем из минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя позволяет

сделать вывод о том, что они представляют собой эффективные теплопроводящие вставки, которые создают дополнительные тепловые потоки через конструкцию, снижая среднее термическое сопротивление ограждающей конструкции. Таким образом, вклад элементов арматуры в тепловой поток через ограждение значителен.

Как видно из табл. 3 температура в зоне арматуры практически на всю глубину

плиты имеет отрицательную температуру, то есть на внутренней поверхности плиты образуется зона отрицательных температур, что недопустимо.

Анализ распределения температур по выделенным зонам термических сопротивлений приведен на рисунке 3.

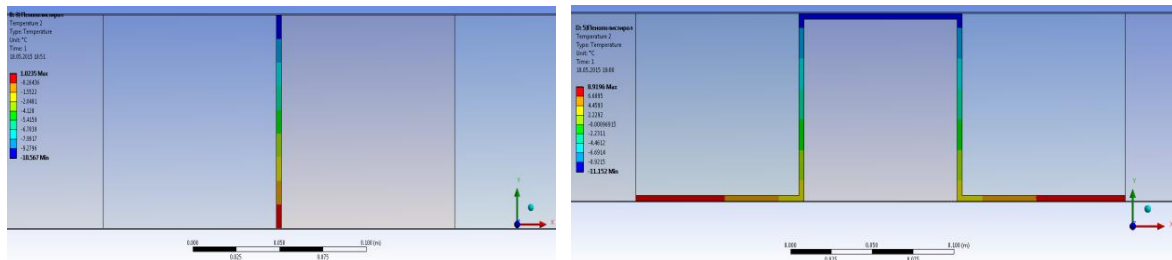


Рис. 3. Распределение температур по толщине армирующих элементов из ПВХ

Таким образом, армирующие элементы трехслойных панелей с металлическими наружными обшивками и утеплителем из минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя образуют зоны повышенной тепловой проводимости и способствуют образованию областей

пониженных температур на внутренних поверхностях ограждения. В связи с чем, предложено следующее конструктивное решение: выполнение пенополистирольного вкладыша в зоне присоединения армирующего элемента к наружным обшивкам (рис.4).

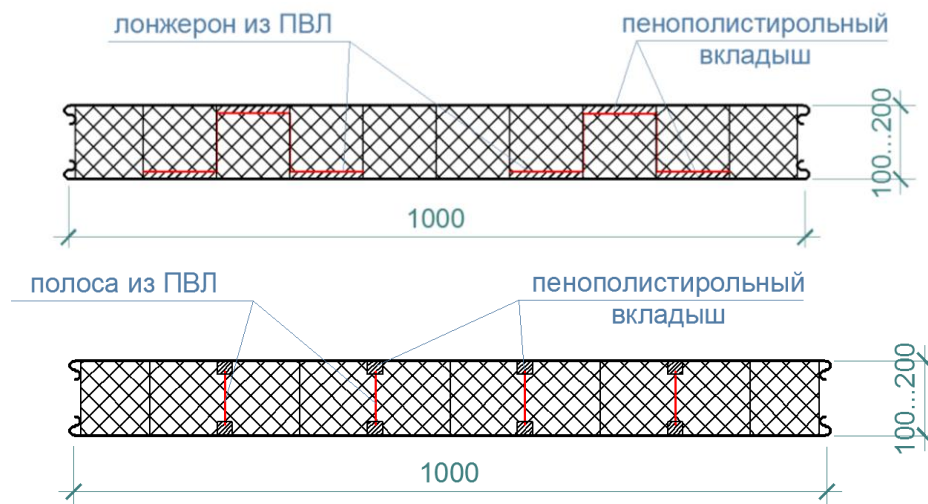


Рис. 4. Конструктивные мероприятия, направленные на устранение зон локального промерзания панелей.

Положительное влияние наличия пенополистирольного вкладыша демонстрируется температурными изополями, приведенными на рис. 5.

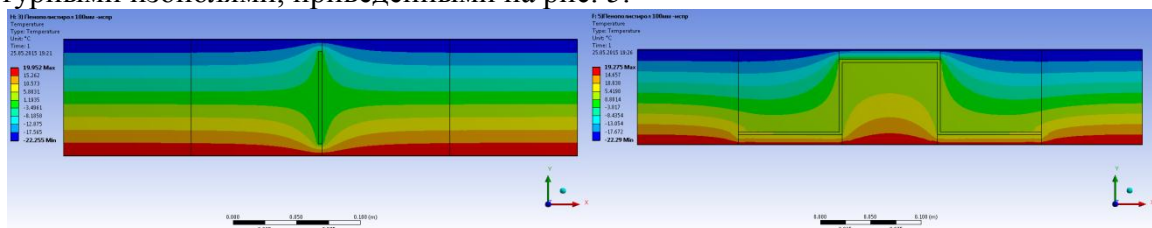


Рис. 5. Температурные изополя панели с армирующими элементами и вставками из пенополистирола

На рис. 6 и 7 приведены внутренней стороне ограждающей сравнительные диаграммы температур на конструкции в виде сэндвич-панели с

армирующими элементами до применения температуре наружного воздуха -23°C . пенополистирольного вкладыша и после при

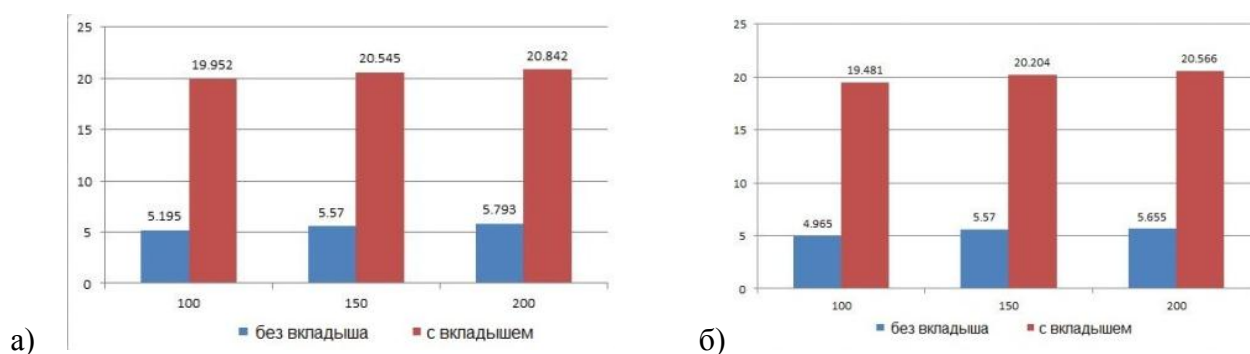


Рис. 6. Температура на внутренней стороне ограждающей конструкции для панели с плоским армирующим элементом из ПВХ: а) для пенополистирольного заполнителя; б) для минераловатного заполнителя.

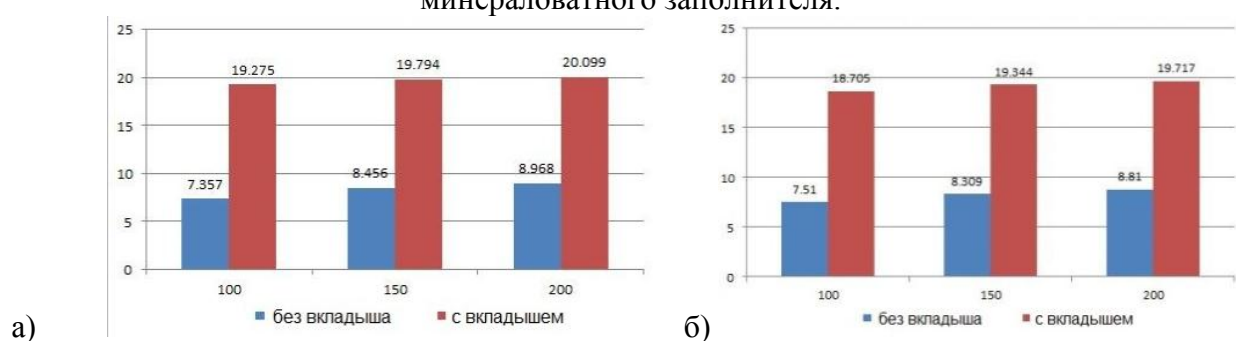


Рис. 7. Температура на внутренней стороне ограждающей конструкции для панели с объемным лонжероном из ПВХ: а) для пенополистирольного заполнителя; б) для минераловатного заполнителя.

Как видно из графиков, использование пенополистирольного вкладыша способствует равномерному распределению температуры по толщине сэндвич-панели, позволяя избежать появления зон локального промерзания, так называемых «мостиков холода».

Проведенный анализ свидетельствует о том, что рассматриваемые трехслойные сэндвич-панели с металлическими

наружными обшивками и утеплителем из минераловатных плит и пенополистирольного заполнителя позволяют создавать конструкции, сочетающие в себе функции несущей и теплоизолирующей конструкции и обладающие высокими эксплуатационными характеристиками в широком диапазоне изменения температурных параметров.

Список использованной литературы

1. Experimental Investigation of Precast Concrete Insulated Sandwich Panels with Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Connectors/Douglas Tomlinson, Amir Fam/ACI Structural Journal. Vol. 111 (2014). - p.- 595-606.
2. Шмуклер В.С. Каркасные системы облегченного типа / В.С. Шмуклер, Ю.А. Климов, Н.П. Бурак. – Х.: Золотые страницы, 2008.
3. Ильдияров Е.В. Несущая способность и деформативность кровельных сэндвич-панелей с минераловатным средним слоем на основе базальтового волокна: дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Ильдияров Евгений Викторович. – Самара, 2009. – 178 с. – Библиогр. : с. 163-168.
4. Хайруллин Л.Р. Несущая способность сэндвич-панелей с металлическими обшивками и технологическими стыками среднего слоя. : дис. канд. техн. наук: 05.23.01 / Хайруллин Ленар Равилевич. – Казань, 2012. –205 с. – Библиогр. : с. 186-199.
5. Experimental investigation of wall and roof sandwich panels of “Aluterm” series (Экспериментальное исследование стеновых и кровельных сэндвич-панелей серии

«Алюотерм»). / В.С. Шмуклер, Е.И. Лугченко, Е.А. Петрова. // Коммунальное хозяйство городов. – №118 (2014) – С. 11-20.

6. Анализ характера деформирования и разрушения трехслойных стеновых панелей серии «Алюотерм» / Е.А. Петрова. //Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. – Випуск 151 (2015) – С. 26-43.

7. Э.Д. Чихладзе. Температурно-влажностный режим сталебетонных несущих и ограждающих конструкций промышленных зданий и сооружений/ Э.Д. Чихладзе, Л.В. Гапонова; Харьков. нац. акад. город. хоз-ва. – Х.:ХНАГХ, 2011. – 188с.

8. ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель» зі Зміною №1 від 1 липня 2013 року. МінБуд України. – Київ, 2006. – 70с.

9. Autodesk Simulation Mechanical. Режим доступа: <http://www.autodesk.ru/products/simulation/features/simulation-mechanical/all/gallery-view> (дата обращения: 01.06.2015).

10.Елдашов Ю.А., Кашеварова Г.Г. Сравнительный анализ вариантов конструкции узла примыкания оконного блока к стеновому проему методом конечных элементов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура . 2007. №22 (94).

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.П.Кожушко

Петрова Елена Александровна, аспирантка кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства им. А.Н. Бекетова.

Гапонова Людмила Викторовна, к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства им. А.Н. Бекетова.

Petrova Elena Aleksandrovna, graduate student of the Construction Department of O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Gaponova Lyudmila Viktorovna, PhD, docent of the Construction Department of O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

Статья принята 05.05.2015р.

УДК 624.138.4

ВИЗНАЧЕННЯ БУФЕРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПИЛУВАТО-ГЛИНИСТИХ ТА ПІЩАНИХ ҐРУНТІВ

Асист. Г.М.Левенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ БУФЕРНЫХ СВОЙСТВ ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫХ И ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Асист. А.М.Левенко

THE DEFINITION OF BUFFER PROPERTIES OF SILTY-CLAY AND SANDY SOILS

Assistant A.Levenko

В роботі розглянуто принципи діагностики, оптимізації та нормативного прогнозу рН-буферності пилувато-глинистих та піщаних ґрунтів. На підставі аналізу літературних джерел і власних експериментальних даних показано роль рН-буферних механізмів у регуляції кислотно-основної рівноваги ґрунтів. Наведено основні компоненти буферних механізмів ґрунтів, які визначають стан їхньої кислотно-основної рівноваги.

Ключові слова: ґрунти, буферні механізми, перуксусна кислота, рН-буферність.

В работе рассмотрены принципы диагностики, оптимизации и нормативного прогноза рН-буферности пылевато-глинистых и песчаных грунтов. На

основаним аналізом літературних джерел і власних експериментальних даних показана роль рН-буферних механізмів в регуляції кислотно-основного рівноважия ґрунту. Приведені основні компоненти буферних механізмів ґрунту, які визначають стан їх кислотно-основного рівноважия.

Ключові слова: ґрунти, буферні механізми, пероуксусна кислота, рН-буферність.

Significant progress in the development of monitoring observations of the change of soil under the influence of industrial chemical pollution and meliorants, was achieved thanks to the latest scientific achievements from theory buffer capacity of soils. Among the numerous studies on the study of the buffer capacity of soils dominated work buffer acid-alkaline soils. Thus, given that the last time a common problem of soil contamination by industrial effluents directly beneath industrial buildings, which in turn leads to further unacceptable strain foundations, foundation movement and destruction of the building there was a need to address the impact of wastewater on the buffer properties of soils foundations.

Principles of diagnostics, optimization and normative prognosis of pH- buffer of clay and sandy soils are in-process considered. On the basis of analysis of literary sources and own experimental data there role of pH- buffer mechanisms is shown in adjusting of acid-basic equilibrium of soils. Basic components over of buffer mechanisms of soils that determine the state of their acid-basic equilibrium are brought.

Keywords: soils, buffer mechanisms, peracetic acid, pH- buffer.

Вступ. Значного прогресу у розвитку моніторингових спостережень за зміною якості ґрунтів, під впливом промислового хімічного забруднення та меліорантів, вдалося досягти завдяки останнім науковим досягненням з теорії буферної здатності ґрунтів. Серед численних досліджень з проблем вивчення буферної здатності ґрунтів домінують роботи з кислотно-лужної буферності ґрунтів. Таким чином, враховуючи те, що в останній час поширена проблема забруднення промисловими стоками ґрунтів безпосередньо під промисловими будівлями, що у свою чергу призводить до подальших неприпустимих деформацій основ, переміщень фундаментів і руйнування будівельних конструкцій виникла потреба у вирішенні питання впливу цих стоків на буферні властивості ґрунтів основ.

Постановка питання та його зв'язок з науковими та практичними задачами. З практичного погляду, особливий інтерес представляє вивчення закономірностей функціонування ґрунтових буферних механізмів, які формують та забезпечують буферні властивості ґрунту. Це дозволить прогнозувати поведінку ґрунтів у разі їх забруднення промисловими стоками

Аналіз останніх вишукувань та публікацій. Аналіз наукової літератури,

присвяченої відносно новому напрямку ґрунтознавчої науки - вивченню буферних властивостей ґрунтів, свідчить про те, що в останні роки до цієї проблематики пригорнуто значну увагу фахівців як за кордоном [1-4], так і в Україні [5-9]. Цими працями встановлено, що буферність ґрунтів, тобто його стійка здатність зберігати і відновлювати фізико-хімічні, біологічні та інші генетично притаманні або антропогенно створені властивості, під дією зовнішніх і внутрішніх впливів, є одним із потужних показників поведінки ґрунтів.

Найбільш важливими ґрунтовими компонентами і реакціями з буферною дією є: приєднання та віддача протонів ґрунтовими колоїдами (глинистими мінералами, органічними колоїдами, гідроксидами металів, гідратованими металевими оксидами); утворення-розчинення мінералів, що легко вивітрюються; перетворення полімерів гідроксидів алюмінію, або алюмінієвих гідросокомплексів; утворення – декомплексація органічних металевих комплексів; карбонатно-кальцієва система $\text{CaCO}_3\text{-Ca(HCO}_3)_2\text{-CO}_2$ [10].

Пилувато-глинистим (карбонатним) ґрунтам з показником $L \geq 3\%$, завдяки їх насиченості кальцієм та магнієм, притаманні буферні механізми з яскраво вираженою асиметричною функцією, що відображується

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

у переважній більшості процесів нейтралізації протонів (H^+), тобто ці ґрунти проявляють значну протикислотну здатність.

Буферні механізми пісчаних (безкарбонатних) ґрунтів з показником $L < 3\%$ з добре розвинутим органічно-мінеральним колоїдним комплексом, функціонують більш симетрично у порівнянні з карбонатними ґрунтами, що відображується у їх ефективній як протикислотній, так і протилужній дії.[10]

Ціль вишукувань. Визначення впливу перуксусної кислоти на буферні властивості ґрунтів з різним показником L – вмістом глинистих часток у ґрунті у %.

Основне викладення матеріалу. В процесі лабораторних вишукувань було виявлено залежність буферних властивостей

ґрунтів з різним вмістом глинистих часток: $L < 3\%$, $3\% < L < 10\%$, $10\% < L < 30\%$, $L > 30\%$, під впливом перуксусної кислоти.

Кількісні показники кислотно-основної буферності включають[20]: буферна ємність в лужному (БЄл) і кислотному (БЄк) крилах, загальний оціночний показник буферності – ЗОПБ, у балах, коефіцієнт буферної асиметрії – КБА.

За результатами вишукувань були побудовані графічні моделі рН-буферності при 1% перуксусної кислоти при різних параметрах L рис. 1-4, при 2% перуксусної кислоти при різних параметрах L рис. 5-8, при 3% перуксусної кислоти при різних параметрах L рис. 9-12, при 3% перуксусної кислоти при різних параметрах L рис. 13-16.

Показники рН-буферності, при застосуванні перуксусної кислоти

Параметр $L, \%$	рН у ВТ	Буферна ємність, бали		КБА	ЗОПБ, бали
		БЄл	БЄк		
1% кислота					
<3%,	6,85	3,74	17,95	-0,66	7,48
3 – 10 %	7,75	6,79	30,28	-0,63	13,58
10 – 30 %	9,20	15,57	58,99	-0,58	31,15
> 30 %	7,95	15,21	52,87	-0,55	30,42
2% кислота					
<3%,	6,85	4,27	15,59	-0,57	8,54
3 – 10 %	7,75	6,79	26,96	-0,60	13,58
10 – 30 %	9,20	15,57	54,25	-0,55	31,15
> 30 %	7,95	15,21	50,06	-0,53	30,42
3% кислота					
<3%,	6,85	3,74	14,22	-0,58	7,48
3 – 10 %	7,75	6,79	50,07	-0,76	13,58
10 – 30 %	9,20	15,57	53,99	-0,55	31,15
> 30 %	7,95	15,21	24,61	-0,24	11,62

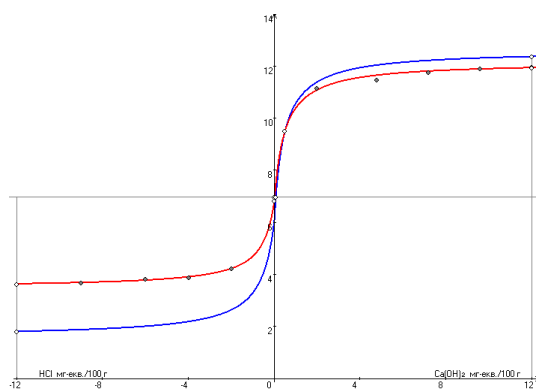


Рис. 1. Графічна модель рН-буферності при 1% кислоті, параметр $L < 3\%$ – 10 %

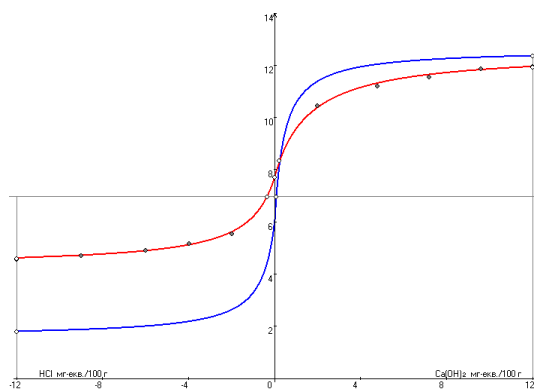


Рис. 2. Графічна модель рН-буферності при 1% кислоті, параметр L 3 – 10 %

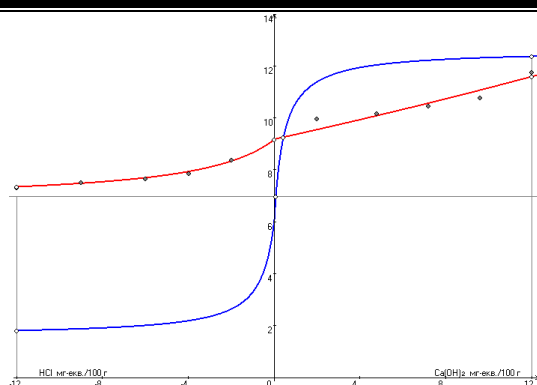


Рис. 3. Графічна модель рН-буферності при 1% кислота, параметр L 10 – 30 %

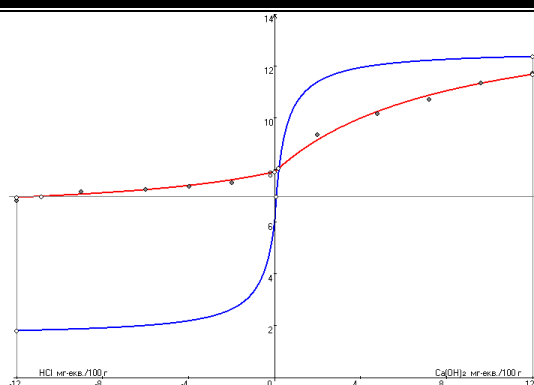


Рис. 4. Графічна модель рН-при 1% кислота, параметр $L > 30$ %

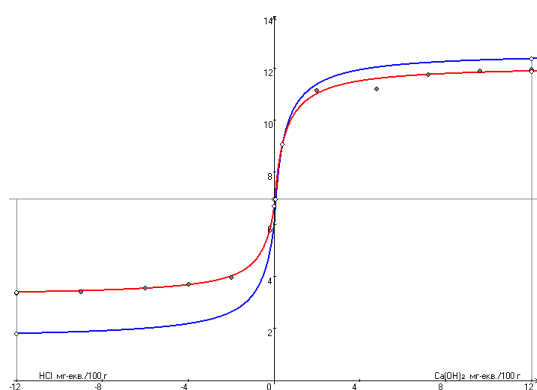


Рис. 5. Графічна модель рН-буферності при 2% кислота, параметр $L < 3$ %

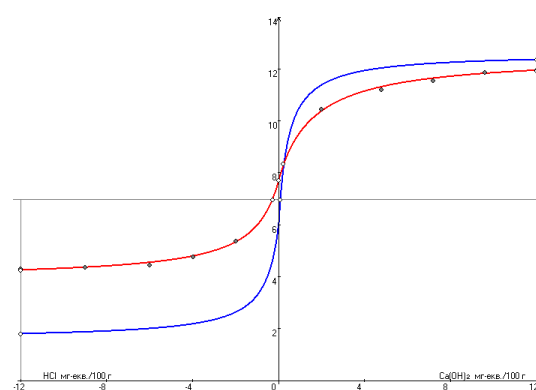


Рис. 6. Графічна модель рН-при 2% кислота, параметр L 3 – 10 %

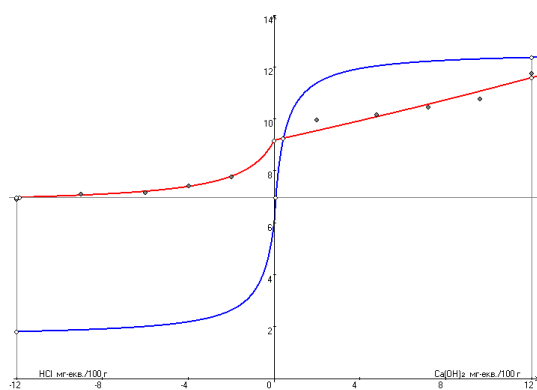


Рис. 7. Графічна модель рН-буферності при 2% кислота, параметр L 10 – 30 %

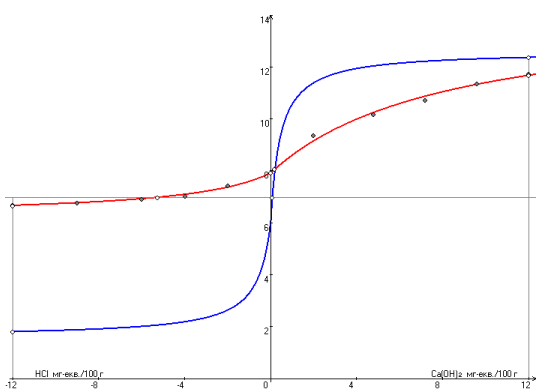


Рис. 8. Графічна модель рН-при 2% кислота, параметр $L > 30$ %

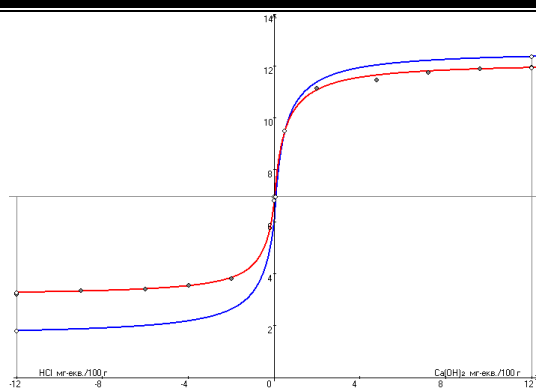


Рис. 9. Графічна модель рН-буферності при 3% кислота, параметр $L < 3\%$ 10 %

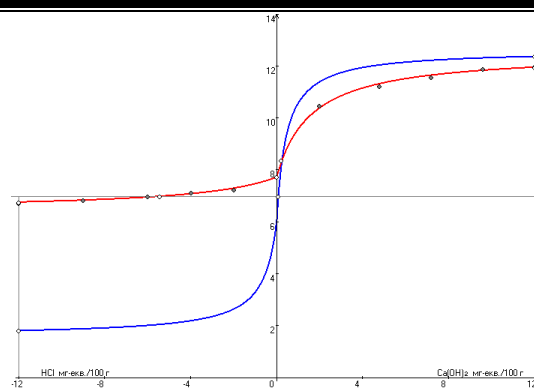


Рис. 10. Графічна модель рН-буферності при 3% кислота, параметр $L = 3 - 10\%$

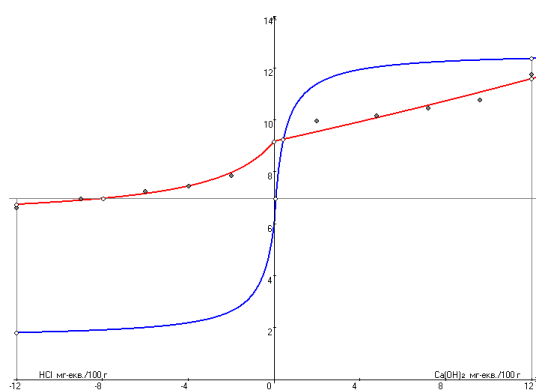


Рис. 11. Графічна модель рН-буферності при 3% кислота, параметр $L = 10 - 30\%$

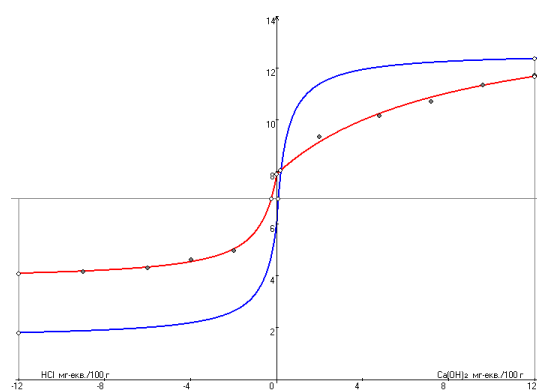


Рис. 12. Графічна модель рН-буферності при 3% кислота, параметр $L > 30\%$

Висновки. Із результатів вишукувань видно, що буферна ємкість як в БЄл, так і в БЄк зростає із зростанням параметра L , проте знижується при підвищенні концентрації перексусної кислоти. Коефіцієнт буферної асиметрії (КБА) – зменшується при підвищенні параметра L , а зміна концентрації кислоти на нього не впливає. Загальний оціночний показник буферності (ЗОПБ) –

підвищується при підвищенні параметра L , а зміна концентрації кислоти на нього також не впливає.

Таким чином, діагностика, оптимізація та нормативний прогноз рН-буферності дають змогу здійснювати на високому сучасному методологічному рівні науковий моніторинг ґрунтів та прогнозувати поведінку ґрунтів в разі їх забруднення промисловими стоками.

Список використаних джерел

1. Schwertmann U., Susser P., Natscher L. Protonen buffersubstanzen in Boden // Pflanz. ernahr. und Bodenkunde. - 1987. - Bd. 150 (3).
2. Mowbrey T., Schlesinger W.H. The buffer capacity of organic soils of the Bluff mountain fen, North Carolina // Soil Sci. - 1988. - V. 146. - № 6.
3. Филеп Д., Рэдли М. Формы кислотности и кислотнo-основная буферность почв // Почвоведение. - 1989. - № 12. - С. 48-59.

4. Хуа Ло. Буферность почв по отношению к тяжелым металлам и фтору в некоторых почвах КНР // Изв. ТСХА, вып.1, 1991. –С.202-206.
5. Трускавецький Р.С. Буферність ґрунту: методологія, види, меліоративне та агроекологічне значення // Матеріали ІV з'їзду УТГА. / Пленарні доповіді. – Харків. – 1994. – С. 38-41.
6. Надточий П. П. Опыт составления картограммы кислотно-основной буферности почв // Агрехимия. – 1996. №6. – С. 20-26.
7. Позняк С.П., Гамкало М.З. Кислотно-основная буферность бурозёмов Украинских Карпат // Почвоведение. - 2001. - № 6. - С. 660-669.
8. Трускавецький Р.С. Буферна здатність ґрунтів та їх основні функції // Харків: ППВ „Нове слово”, 2003. – 225 с.
9. Трускавецький Р.С., Чешко Н.Ф., Цапко Ю.Л. Буферні механізми ґрунту: актуальність, стан і перспективи досліджень // Вісник аграрної науки. – 2006. Спеціальний випуск, квітень. – С. 27-33.
10. Цапко Ю.Л. Науковий моніторинг ґрунтів за графічними моделями буферності // Вісник ХНАУ. – Харків, 2004. – № 1. – С. 114-117.

Рецензент д.т.н., професор В.С. Шмуклер

Левенко Ганна Михайлівна, асистент кафедри механіки ґрунтів, фундаментів та інженерної геології, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова. Тел. +380966260139. Email – levenkoanna@mail.ru

Levenko G. assistant of department of Mechanics of soils, foundations and engineering geology, Kharkov national University of urban economy named A. N. Beketov. Tel. of 380966260139. Email -levenkoanna@mail.ru

Стаття прийнята 25.04.2015р.

УДК 624.072.2

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ ТА ГРАНИЧНИЙ СТАН СТАЛЕБЕТОННИХ ПУСТОТНИХ ПЛИТ

К-т техн. наук О.В. Лобяк, здобувач Д.В. Головко (Український державний університет залізничного транспорту)

STRESS-STRAIN AND LIMITING STATE OF STEEL-CONCRETE AND HOLLOW CORE SLABS

Cand. of techn. sciences A. Lobiak, candidate D. Golovko (Ukrainian State University of Railway Transport)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ И ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕЛЕБЕТОННЫХ ПУСТОТНЫХ ПЛИТ

К-т техн. наук А.В. Лобяк, соискатель Д.В. Головко (Украинский государственный университет железнодорожного транспорта)

Представлені результати чисельних і експериментальних досліджень сталобетонних пустотних плит перекриття. Розроблено скінченно-елементні моделі суцільних і пустотних перекриттів та на їх основі виконана оцінка напружено-деформованого і граничного стану системи з урахуванням податливості зв'язків та нелінійних властивостей матеріалів. В

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

результаті визначено раціональну геометричну форму, розміри і розташування пустотоутворювачів. Виконано порівняння теоретичних та експериментальних результатів.

Ключові слова: скінченно-елементна модель, бетон, сталь, плити перекриття, сталебетон, анкерні упори, пустотоутворювач.

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований сталебетонных пустотных плит перекрытия. Разработаны конечно-элементные модели сплошных и пустотных перекрытий и на их основе выполнена оценка напряженно-деформированного и предельного состояния системы с учетом податливости связей и нелинейных свойств материалов. В результате определена рациональная геометрическая форма, размеры и расположение пустотообразователей. Выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: конечно-элементная модель, бетон, сталь, плиты перекрытия, сталебетон, анкерные упоры, пустотообразователь.

The results of numerical and experimental studies of steel-concrete hollow-core slabs are presented. Finite element model of solid and hollow reinforced concrete slabs are developed on their basis the evaluation of the stress-deformed and limiting condition of the entire system and its elements, taking into account the specifics of the construction, compliance of connection within the contact of concrete and steel, the effect of non-linear properties of the materials are produced. As a result the rational geometric shape and the location of the emptiness-former in the body concrete are defined. According to the test the results of change dependence of the relative deformation in the steel sheet and on the surface of the concrete slab from external loads are built. The data of the bearing capacity and the nature of the crack formation are obtained. The comparison of theoretical and experimental results is performed. The assumption about the cutoff of the construction of the blockout sectors is confirmed.

Keywords: finite-element model concrete, steel, floor slabs, steel-concrete, anchor elements, blockout

Вступ. Сучасний розвиток будівництва передбачає використання передових технологій, раціональних конструктивних рішень та вдосконалених методів розрахунку як при зведенні нових, так і реконструкції існуючих споруд. У цьому розумінні багато в чому прогресивним стало впровадження нових конструктивних рішень сталебетонних перекриттів, які дозволяють забезпечити потрібну форму, розміри і несучу здатність. Найбільший ефект від зовнішнього армування досягається в плитах перекриття, що згинаються в двох напрямках. Плоский сталевий лист працює в умовах двовісного напруженого стану, завдяки чому в порівнянні з залізобетонними плитами підвищується жорсткість і несуча здатність сталебетонних аналогів при рівній витраті металу [1-4].

Ефективність прийняття рішень при проектуванні будівельних конструкцій в

цілому і сталебетонних перекриттів зокрема безпосередньо залежить від реалізованого методу розрахунку. При цьому досягнення найкращих результатів може бути забезпечено застосуванням сучасних методів чисельного аналізу та комп'ютерного моделювання [5].

Мета та задачі дослідження. Завданнями розвитку будівельної галузі є забезпечення надійності будівель і споруд при одночасному зниженні їх матеріалоемності, вартості, трудомісткості на етапах проектування, монтажу та експлуатації. Пріоритетним показником у задачах підвищення економічної ефективності сталебетонних перекриттів прийнято вважати витрати бетону, що визначає власну вагу і вартість конструкцій. Перспективним напрямком у дослідженнях щодо зниження витрат бетону є розробка раціональних схем утворення пустот, які забезпечують ефективність і необхідну

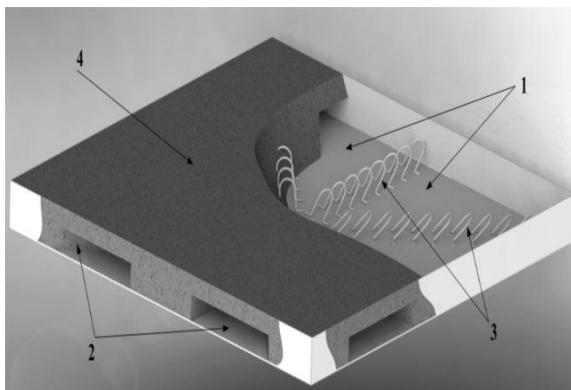
Будівельні матеріали, конструкції та споруди

несучу здатність. У зв'язку з цим становить науковий і практичний інтерес розробка, теоретичне та експериментальне обґрунтування нових, більш універсальних і конкурентоспроможних рішень плит перекриттів з сталобетону.

Дана робота спрямована на вдосконалення сталобетонних плит через експериментально-теоретичний пошук можливостей зниження власної ваги конструкції за рахунок введення до її складу пустот. У цьому напрямку особливий інтерес заслуговує питання впливу пустотних

включень на напружено-деформований та граничний стан сталобетонних плит.

Основна частина дослідження. Запропонована конструкція сталобетонного пустотного перекриття складається з металевих листів, пустотоутворювачів і бетону. При цьому спільна робота бетону і сталі забезпечується анкерними упорами, розташованими по осях симетрії (рис.1). Передбачається, що ефективність перекриття залежить від раціонального визначенні розмірів і схеми розстановки пустотоутворювачів.



Серія	Параметри, мм							
	n	l_1	l_2	h_1	h_2	a_1	b_1	c_1
СП50	11	400	200	40	70	-	-	-
СП100	6	400	200	40	70	-	-	-
СПМ50	11	400	200	40	70	250	250	350
СПМ100	6	400	200	40	70	250	250	350
СПБ50	11	400	200	40	70	300	300	420
СПБ100	6	400	200	40	70	300	300	420

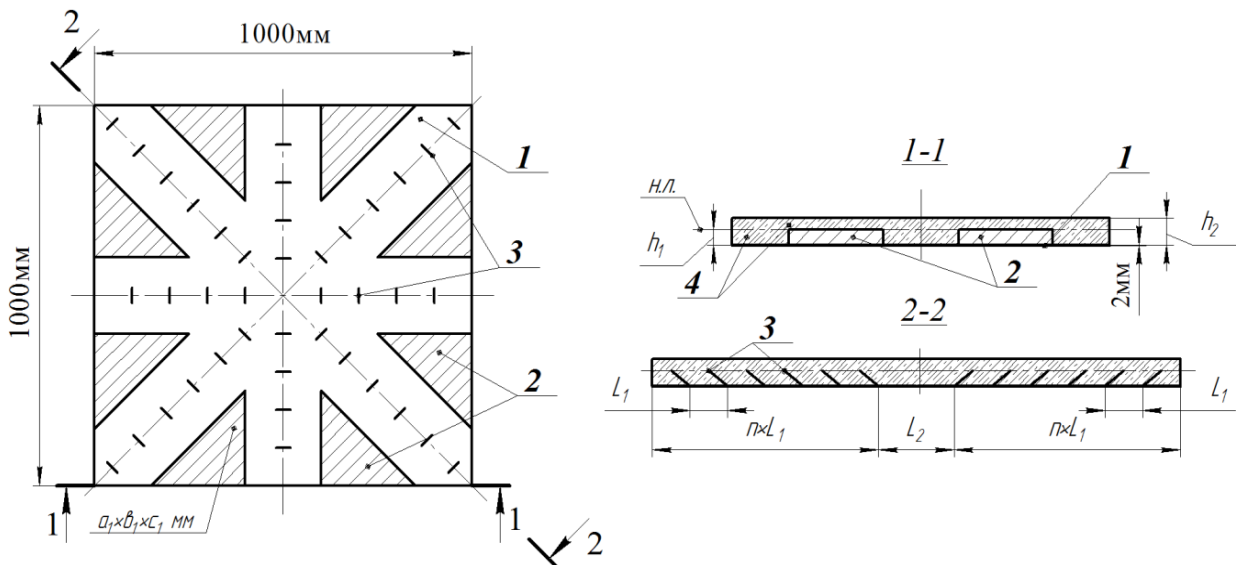


Рис.1. Загальний вид запропонованої конструкції та її схема в плані:

1 – металевий лист; 2 – вставки пустотоутворювачів;
3 – анкерні упори; 4 – бетон

Будемо вважати, що на першому етапі вибір ефективних параметрів пустот можна зробити через аналіз напружено-деформованого стану аналогічної суцільної плити. Для вирішення поставлених завдань ефективно застосування сучасних засобів

чисельного аналізу на основі МСЕ. Тому, в якості інструменту для подальших досліджень приймемо програмний комплекс Ліра [6], який в повній мірі дозволяє розкрити всі особливості розглянутої конструкції.

Запропонована розрахункова схема розроблена з використанням п'яти типів скінченних елементів (далі – СЕ). Бетонна частина являє собою сукупність СЕ, призначених для розрахунку масивних просторових конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності матеріалу. При моделюванні металевих листів застосовувалися геометрично-нелінійні СЕ, які виключають згибну складову в роботі оболонки (мембрани). Пружні зв'язки між мембраною і бетоном задавалися за допомогою двохвузлових СЕ кінцевої жорсткості.

Граничні умови визначені призначенням конструкції і виконані через защемлення металевих листів по кутах. Для математичного опису роботи бетону прийнятий експоненціальний закон деформування. Навантаження прикладалося в центр плити по поверхні з розмірами 20×20 см. Розрахунок виконувався кроково-ітераційним методом до появи граничного стану в плиті.

У результаті аналізу роботи суцільних плит перекриття встановлено особливості деформування, тріщиноутворення, розподілу напружень (рис. 2), та закони зміни зусиль зсуву по контакту сталі та бетону.

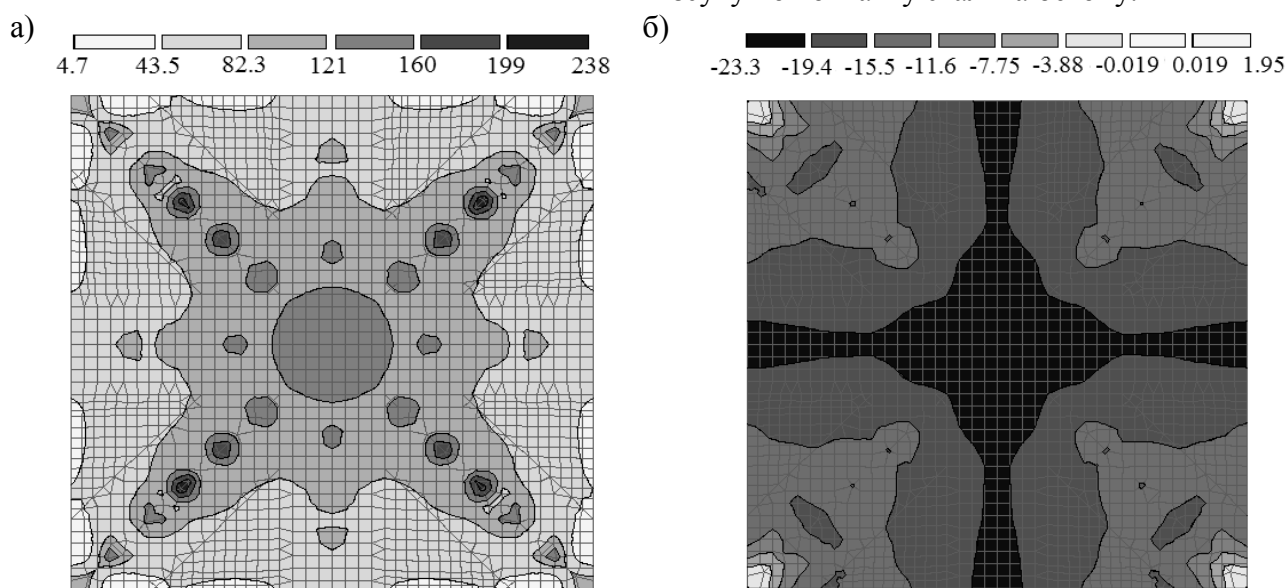


Рис. 2. Ізополя напружень в сталевому листі (а) та на верхній поверхні бетону (б) для суцільної плити, МПа

На наступному етапі в роботі були розроблені скінченно-елементні моделі пустотних плит і одночасно виконувалася вибірка конструкцій з раціональним діапазоном характеристик для експериментальних досліджень. Так були змодельовані пустотні зразки серій СПМ і СПБ (рис. 1) з різним кроком анкерних упорів. Місця розташування пустот в бетоні визначалися аналізом головних напружень в мембрані. Утворення пустот приймалося в розтягнутій зоні бетону, яка контактує з мембраною в області малих напружень.

Проведений аналіз напружено-деформованого стану плит з пустотами встановив наступні особливості.

1. Вичерпання несучої здатності пустотної сталобетонної плити відбувається в момент досягнення граничних напружень в бетоні і локально – в мембрані (рис. 3,4).

2. Стискаючі напруження в бетоні виникають уздовж ліній, що проходять через середини сторін у верхній грані і в опорних елементах – у нижній грані. При цьому максимальні значення напружень зверху плити досягають -24.4 МПа, а в опорних елементах -22 МПа (рис. 3).

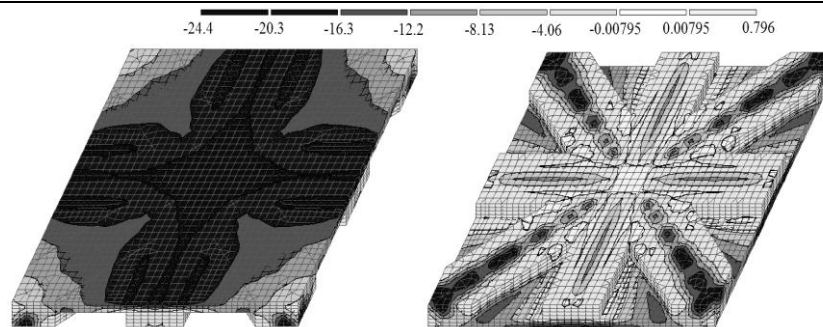


Рис.3. Ізополю головних стискаючих напружень в бетоні зразка СПМ50, МПа

3. Напруження розтягу в бетоні переважно виникають за межами пустот, поширюються к центру плити і складають на останній стадії 1.95 МПа.

4. Розподіл напружень в металевому листі виражено уздовж його діагоналей, починаючи від вузлів закріплення і закінчуючи в центрі. При цьому, значення

напружень, що виникають під поверхнею прикладання навантаження, не перевищує 142-164 МПа. Максимальні напруження виникають навколо зв'язків зсуву, розташованих найближче до центру і складають 208 МПа для зразків СПМ і 240 МПа – для зразків серії СПБ (рис.4).

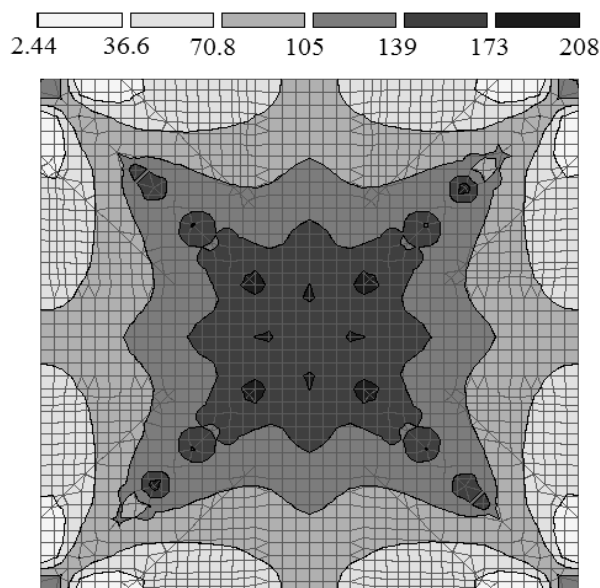


Рис.4. Ізополю еквівалентних напружень зразка СПМ50, МПа

5. Уздовж діагоналей екстремум зусиль виникає в зв'язках, розташованих на відстані 25-35 см від вузлів закріплення листа. Напруження в зв'язках становлять 75-90% від розрахункового опору матеріалу анкера.

Для перевірки зроблених припущень на наступному етапі були проведені експериментальні дослідження. Для випробувань прийнято три серії зразків: СПМ (рис. 5), СПБ – сталобетонні пустотні; СП - сталобетонні суцільні.

Усі розглянуті зразки представляють собою еталони розрахункових моделей і за розмірами не мають схожості з плитами, рекомендованими для застосування. Разом з тим передбачається, що після відповідної верифікації, основні висновки, отримані в процесі дослідження, можуть також поширюватися на плити, рекомендовані для практичного використання.

Спільна робота сталового листа і бетону забезпечується за рахунок петльових анкерів, встановлених з кроком 50 мм (СП50, СПМ50, СПБ50) і 100 мм (СП100, СПМ100,

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

СПБ100). Матеріал анкера – дріт класу Вр-1 діаметром 4 мм. Форма пустотоутворювачів представляє собою тригранну призму висотою 40 мм і розмірами в плані 250×250×350 мм (СПМ50, СПМ100) або 300×300×420 мм (СПБ50, СПБ100). Матеріал пустотоутворювачів – пінополістирол.

Для визначення міцності матеріалів попередньо виконувалося випробування контрольних бетонних і сталевих зразків. За

усередненими значеннями кубкової міцності бетону $f_{ck.cube} = 36.7$ МПа прийнятий клас бетону С30/35. Границя текучості сталі $f_{yd} = 225$ МПа, тимчасовий опір на розтяг $f_{au} = 290$ МПа.

При випробуванні плит деформації вимірювалися методом електротензометрії із застосуванням тензорезисторів з базою 10 мм на сталевому листі (ДС) і базою 15 мм (ДБ) – на бетоні (рис. 6).

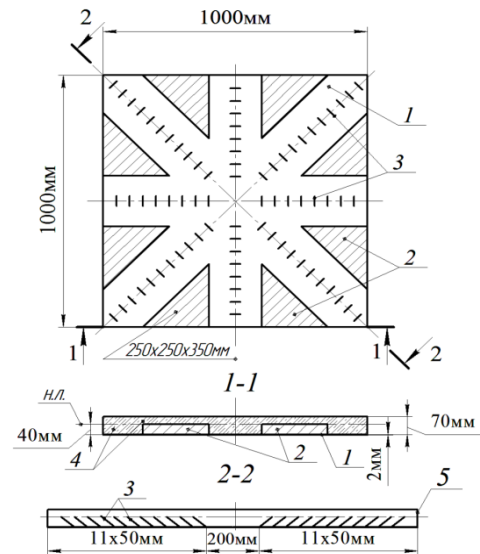
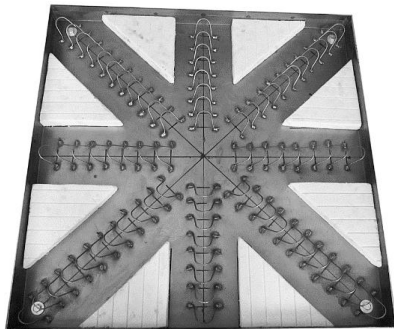


Рис. 5. Зовнішній вигляд до бетонування та схема зразка СПМ: 1 – металевий лист; 2 – пустотоутворювач; 3 – анкерні упори; 4 – бетон

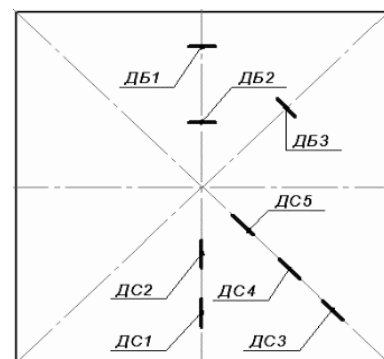
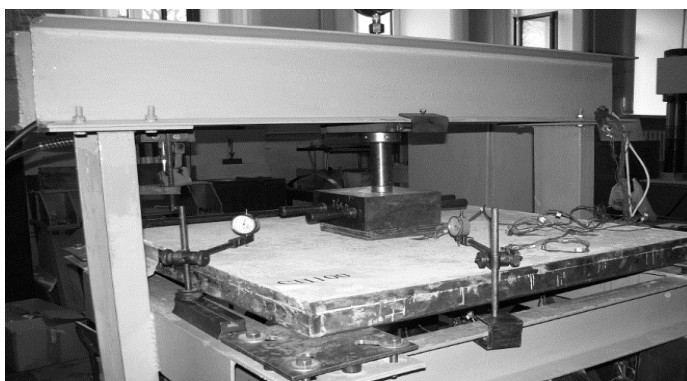


Рис.6. Експериментальна установка і схема розстановки датчиків

Показання датчиків визначали за допомогою багатоканальної вимірювальної системи ВВП-8, прогини – індикаторами часового типу. Навантаження виконувалося ступенями по 5 кН з 20-ти хвилинною

витримкою на кожній ступені. В результаті випробування отримані дані про несучу здатність плит (табл. 1), характер деформування і тріщиноутворення.

Дані за результатами випробувань

Серія зразків	Несуча здатність, кН	Прогин при навантаженні 120 кН, мм	Деформація в бетоні при навантаженні 120 кН, $\epsilon_c \cdot 10^{-3}$		Деформація в металі при навантаженні 120 кН, $\epsilon_{au} \cdot 10^{-3}$	
			в центрі плити	по діагоналі	в центрі плити	по діагоналі
СП50	150	8.64	-1.67	-1.34	0.59	0.83
СП100	135	9.06	-2.01	-1.67	0.59	0.95
СПМ50	150	9.34	-1.78	-1.48	0.72	0.94
СПМ100	130	9.86	-2.25	-1.89	0.81	1.02
СПБ50	145	10.25	-2.52	-1.69	0.74	0.98
СПБ100	130	11.04	-2.79	-1.97	0.84	1.09

За результатами випробувань для зразків усіх серій отримані залежності зміни відносних деформацій на поверхні сталевого листа і бетону від зовнішнього

навантаження. Як приклад у статті наводяться результати для деформацій, отриманих при випробуванні плити СПБ50 (рис. 7, 8).

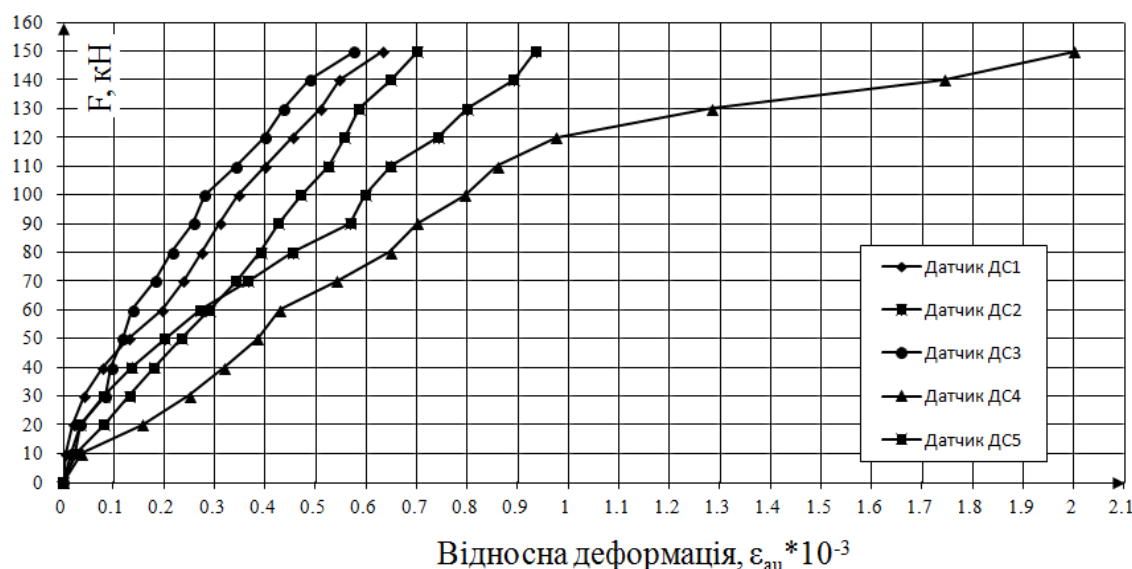


Рис. 7. Графік залежності ϵ_{au} (F) для металевого листа зразка СПБ50

За отриманими результатами встановлено, що на початковій стадії навантаження переважно виникають пружні деформації. При навантаженні рівному 55-65% від руйнуючого в бетонній частині уздовж центральних осей спостерігається поява перших тріщин, а в сталевому листі при цьому розвиваються напруження в діапазоні 45-57% від границі текучості.

Напруження в листі переважно виникають в напрямку діагоналей та становлять 84-115 МПа. В області анкерів рівень напружень вище на 20-35% в порівнянні з іншими точками, що лежать уздовж анкерних ліній. При досягненні навантажень більше 85-90% від руйнуючого, спостерігається інтенсивне розповсюдження тріщин та руйнування бетону.

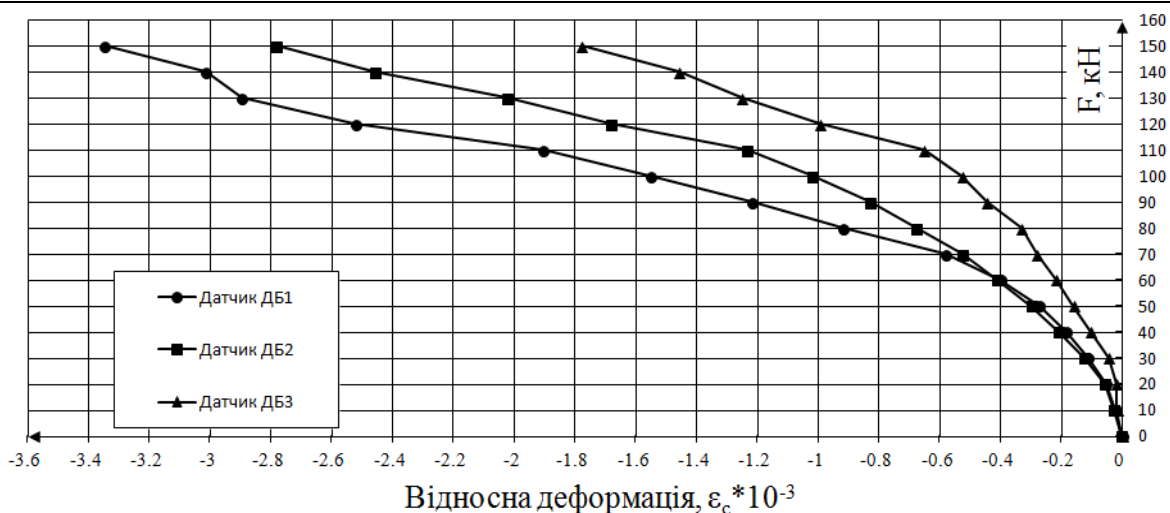


Рис.8. Графік залежності $\epsilon_c(F)$ для бетону зразка СПБ50

Відмінність зразків з кроком анкерних упорів 100 мм виражається в характері тріщиноутворення та несучої здатності. Вже при рівні напружень 35-50% від руйнуючої, зафіксовані перші тріщини в центральній частині плити, а при навантаженні 70-80 кН, тріщини з'являються в місці кріплення і далі розвиваються за напрямом діагоналей. Розвиток напружень в металевому листі відбувається аналогічно серіям з кроком 50 мм. При навантаженні 70-80 кН максимальне значення деформацій між анкерами спостерігається в зразку

СПБ100 і становить 170-186 МПа. При рівні напружень 70-80% від руйнуючого в області деяких анкерних упорів виникають напруження, що відповідають межі текучості сталі. При досягненні навантажень 78-89% від несучої здатності, спостерігається значне розподілення тріщин в центральній частині.

Після завершення випробувань виконувалося розкриття конструкцій, що дало можливість оцінити цілісність бетону в області пустотоутворювачів і характер тріщиноутворення в розтягнутій зоні (рис. 9).

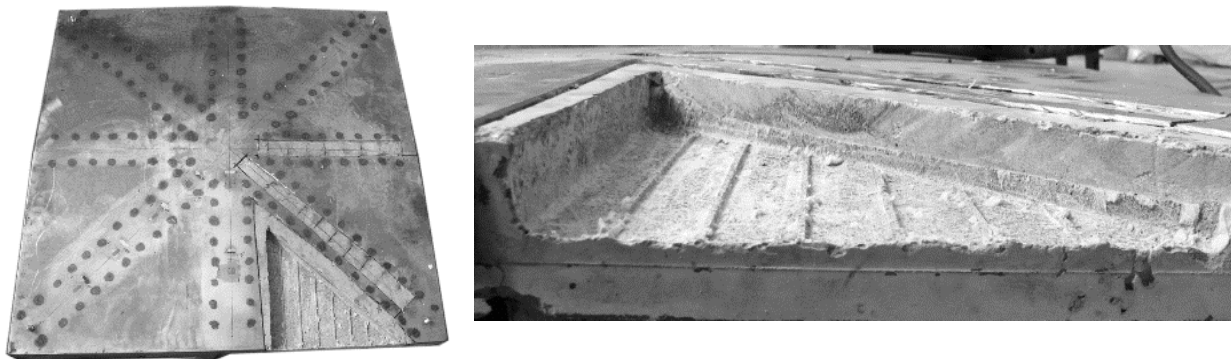


Рис. 9. Розкриття після випробувань пустота зразка СПБ50

Встановлено, що у всіх зразках зберігалася 100% працездатних анкерів з бетоном в їх області без ознак руйнування, що підтверджує припущення про відносне виключення відповідних секторів з роботи конструкції. Тріщиноутворення виражено в напрямку діагоналей і прямих, що проходять через середини сторін. При зростанні числа анкерних упорів в два рази, жорсткість

конструкції збільшується на 3-5%, а несуча здатність – на 11-15%.

В результаті порівняння експериментальних і теоретичних даних щодо несучої здатності, тріщиноутворення, схеми деформування та розподілу напружень, встановлено достатня збіжність отриманих результатів (табл.2).

Порівняння експериментальних та теоретичних значень несучої здатності сталобетонних плит розміром 100×100 см

Серія зразків	Витрата бетонної суміші, м ³	Економія бетонної суміші, м ³	Зниження власної ваги, %	Несуча здатність F _{lim(експ.)} , кН	Несуча здатність F _{lim(теор.)} , кН	Δ, %
СП50	0,07	–	–	150	145,8	2,8
СП100	0,07	–	–	135	128,4	4,8
СПМ50	0,06	0,009	14,3	150	144,3	3,8
СПМ100	0,06	0,009	14,3	130	125,7	3,4
СПБ50	0,056	0,012	20,6	145	143,2	1,24
СПБ100	0,056	0,012	20,6	130	123,8	4,8

Висновки з дослідження.

1. Розроблені нові елементи ефективних сталобетонних пустотних плит шляхом вставок пустотоутворювачів в тіло бетону.

2. Розроблені скінченно-елементні моделі сталобетонних пустотних плит перекриття і на їх підставі виконана оцінка напружено-деформованого стану.

3. Проведені експериментальні дослідження пустотних плит перекриття з різними за розмірами пустотами і змінним кроком анкерних упорів при дії статичного навантаження. В результаті чого встановлено:

- при утворення в бетоні перших тріщин, в сталевому листі в напрямку

діагоналей розвиваються напруження в діапазоні 45-57% від межі текучості;

- навколо анкерів рівень напружень вище на 20-35% в порівнянні з іншими точками, що лежать уздовж анкерних ліній.

4. Досліджена ступінь впливу пустот і піддатливості зв'язків по контакту бетону і сталі на граничний та напружено-деформований стан конструкції. В результаті чого встановлено:

- сталобетонні плити з пустотами зберігають свою несучу здатність у порівнянні зі своїми суцільними аналогами і при цьому дозволяють знизити власну вагу конструкції на 14-24%;

- при збільшенні числа анкерів в два рази жорсткість конструкції збільшується на 3-5%, а несуча здатність – на 11-15%.

Список використаних джерел

1. Лобяк О.В. Експериментальне дослідження роботи сталобетонного мембранного покриття з квадратним планом [Текст] / О.В. Лобяк // Зб.наук.праць. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – Вип.45., С.128-135.

2. Чихладзе Э.Д. Напряженно-деформированное состояние сталобетонных плит [Текст] / Э.Д. Чихладзе, А.Д. Арсланханов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №2. С.22-26.

3. Стороженко Л.И. Железобетонные конструкции с внешним армированием [Текст] / Л.И. Стороженко – К.: УМКВО, 1989. – 99с.

4. Johnson R.P. Composite structures of steel and concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings [Text] / R.P. Johnson // Blackwell Publishing: Wiley-Blackwell, 2004. – 252p.

5. Лобяк А.В. Моделирование работы сталобетонных пустотных плит перекрытия с учетом нелинейных свойств конструкции и материалов [Текст] / А.В. Лобяк, Д.В. Головка // Зб.наук.статей. Вип.11. – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С.156-162.

6. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций [Текст] / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров – К.: изд. "Факт", 2007. – 394 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор А.А. Плугін

Лобяк Олексій Вікторович, к.т.н., доцент, кафедра Будівельна механіка та гідравліка, Український державний університет залізничного транспорту, тел.730-10-70, e-mail Lobiak@ukr.net

Головка Денис Валерійович, здобувач, кафедра Будівельна механіка та гідравліка, Український державний університет залізничного транспорту, тел.730-10-70, e-mail denis1235@ukr.net

A. Lobiak, cand. of techn. sciences, associate professor, Department of Structural Mechanics and Hydraulics, Ukrainian state university of railway transport, tel.730-10-70, e-mail Lobiak@ukr.net

УДК 624.014.2

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УКЛОННЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ КОНВЕЙЕРНЫХ ГАЛЕРЕЙ

Д-р В.Е. Волкова, аспирант И.С. Смолий

ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОХИЛИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ КОНВЕЄРНИХ ГАЛЕРЕЙ

Д-р В.Є. Волкова, аспірант І.С. Смолий

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF EVASIVE SPANS OF CONVEYOR GALLERIES

Dr. Sci. V.E. Volkova, post-grad. stud. I.S. Smolii

В статье рассмотрены уклонные пролетные строения конвейерных галерей, получившие широкое распространение в комплексе сооружений промышленных предприятий. Конвейерные галереи являются частью транспортной системы горнодобывающих предприятий и относятся к объектам высокой ответственности.

Приведены результаты оценки влияния динамической нагрузки, обусловленной вынужденными колебаниями конвейерной ленты с сыпучим материалом при различных фазах работы, на продольные балки конвейерной галереи открытого сечения.

Ключевые слова: динамика, стальные конструкции, балки, конвейерные галереи.

У статті розглянуті похилі прогонові будови конвеєрних галерей, що одержали широке поширення в комплексі споруд промислових підприємств. Конвеєрні галереї є частиною транспортної системи гірничодобувних підприємств і відносяться до об'єктів високої відповідальності.

Наведено результати оцінки впливу динамічного навантаження, обумовленого вимушеними коливаннями конвеєрної стрічки із сипучим матеріалом при різних фазах роботи, на поздовжні балки конвеєрної галереї відкритого перетину.

Ключові слова: динаміка, сталеві конструкції, балки, конвеєрні галереї.

The article describes the slant spans conveyor galleries, widely used in complex industrial facilities. Conveyor galleries are part of the transport system of the mining enterprises and refer to objects of high responsibility.

The object of the study are spans conveyor galleries mine complexes. Namely - the natural oscillations of symmetric beams welded conveyor galleries.

The calculations were performed using finite element method in the PC environment SCAD. To determine the frequencies and modes of vibrations used block Lanczos.

The variants of constructive solutions beams: no transverse stiffeners with slope angles, as well as transverse stiffeners. Step transverse stiffeners was adopted 2 and 3 m. The beams are considered draft angles: 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 24°. Data were obtained for the longitudinal welded I-beam cross-section of 12 meters.

The results of the evaluation of the effect of dynamic load caused by forced oscillations of the conveyor belt to the bulk material at various phases of work on the longitudinal beams of the conveyor gallery open section.

In the dynamic analysis of the recommendations apply European standards, examines the first 3-5 or lower waveforms.

Keywords: dynamics, steel structures, beams, conveyor galleries.

Введение. Широкое распространение предприятий получили конвейерные галереи. Конвейерные галереи предназначены для в комплексе сооружений промышленных

размещения технических коммуникаций и конвейеров, с помощью которых производится перемещение сыпучих материалов. Галереи представляют собой как горизонтальные, так и наклонные сооружения с продольным углом наклона, не превышающим 24° . В зависимости от условий эксплуатации и требуемого температурного режима галереи проектируют отапливаемыми и не отапливаемыми. Последние, могут быть открытыми, частично или полностью закрытыми. [6]

Применение конвейерного транспорта целесообразно в технологических комплексах поверхности шахт и карьеров, на дробильно-обогащительной и агломерационных фабриках и др., а также при перемещении грузов на значительные расстояния.

Области эффективного использования конвейерного транспорта следующие — на подземных работах — перемещение угля, калийных и марганцевых руд из забоя (а крепких руд — от дробильных комплексов) до пунктов перегрузки в другие транспортные средства или до обогащительной фабрики на поверхности; на открытых работах — перемещение до различных пунктов угля и мягких вскрышных пород, разрабатываемых роторными экскаваторами, а также крепких пород и руд после предварительного дробления. Целесообразно применение конвейерного транспорта в технологических комплексах поверхности шахт и карьеров, на дробильно-обогащительной и агломерационных фабриках и др., а также при перемещении грузов на значительные расстояния до мест потребления.

Постановка проблемы у общем виде и её связь с важными научными и практическими заданиями. Конвейерные галереи являются частью транспортной системы на горнодобывающих предприятиях и относятся к объектам высокой ответственности. [1] Основными несущими конструкциями галерей являются пролетные строения и опоры. Внутри пролетных строений размещаются ленточные конвейеры для транспортировки сыпучих материалов. При необходимости в

пролетных строениях могут быть размещены также технологические коммуникации различного назначения. В пролетных строениях галерей расположена, как правило, только средняя часть ленточного конвейера, а «головная» и «хвостовая» части конвейера — вне пролетных строений. [2] Технологические нагрузки, действующие на строительные конструкции конвейерных галерей, имеют динамический характер, обусловленный вынужденными колебаниями конвейерной ленты с сыпучим материалом при различных фазах работы. [3].

Анализ последних исследований и публикаций. Систематические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования работы ленточных конвейеров и поддерживающих их строительных конструкций, начатые лабораторией защиты от вибраций Уральского промстройинипроекта в 1965 г. по заданию Главпромстройпроекта. [5]

Ранее при расчете конвейерных галерей широко использовался метод, основанный на гипотезе плоских сечений. Однако, такое представление является приближенным по отношению к динамическому поведению балок пролетных строений. Также широко используются модели Тимошенко и Власова [4].

Объект исследования. Объектом исследования являются пролетные строения конвейерных галерей шахтных комплексов. А именно — собственные колебания сварных симметричных балок конвейерных галерей.

Основная часть исследования. Расчеты проводились методом конечных элементов в среде ПК SCAD. Для определения частот и форм собственных колебаний использовался блочный метод Ланцоша. В модели использовались конечные элементы типа «прямоугольная четырехузловая пластина» (КЭ 13) — изгибаемые пластины, лежащие в плоскости XOY. Показатель степени в оценках скорости сходимости для КЭ 13: по перемещениям — 2, по моментам — 2, по поперечным силам — 1. В узлах этих конечных элементов определено по три степени свободы: w — вертикальное перемещение (прогиб), а также UX , UY — углы поворота относительно осей X и Y.

Расчетные модели строились при помощи инструмента «дробление четырехузловых пластин» и генератора треугольных \ четырехугольных сеток конечных элементов на плоскости. Число конечных элементов выбиралось путем сгущения сетки до получения стабильных результатов расчета.

Численный анализ проводился при расчете балок заданной геометрии в диапазоне угла наклона балки относительно горизонта 0° - 24° , наличия или отсутствия поперечных ребер жесткости, изменения шага поперечных ребер жесткости в диапазоне 2-3 м, изменении значения коэффициента гибкости стенки балки λ_w при сохранении момента инерции сечения балки I_x .

Условия закрепления балки соответствовали шарниру. Собственный вес конструкции учитывался.

Моделирование выполнено в ПК «SCAD».

Размеры поперечных сечений балок приняты по рекомендациям Пособия по проектированию конвейерных галерей к СНиП 2.09.03-85.

Рассмотрены варианты конструктивного решения балок: без поперечных ребер жесткости с углами уклона, а также с поперечными ребрами жесткости. Шаг поперечных ребер жесткости был принят 2 и 3 м. Рассмотрены углы уклона балок: 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 24° .

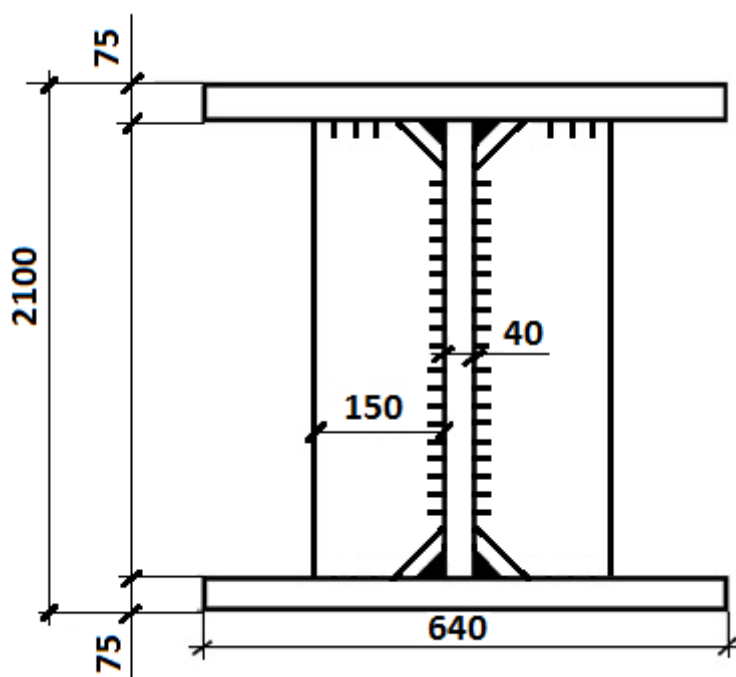


Рис. 1 Поперечное сечение балки

Данные были получены для продольной сварной балки двутаврового сечения длиной 12 м. Пример поперечного сечения см. рис. 1. Модель разбивалась на конечные элементы типа «пластина». Размеры квадратных конечных элементов 100×100 мм. Стенка балки и поперечные ребра генерировались сеткой произвольной формы на плоскости. Далее задавался контур и генерировалась сетка прямоугольных конечных элементов на плоскости. Были приняты следующие граничные условия:

закрепление концов балки – с одной стороны разрешены перемещения по оси X и Z.

Приложенные нагрузки: собственный вес; динамическая нагрузка – модальный анализ. Далее производился расчет и анализ результатов.

В динамическом анализе применяются рекомендации европейских норм. Таким образом, исследуются первые или низшие 3-5 форм колебаний. Для рассмотренных вариантов первая и вторая формы соответствуют изгибу (см. рис. 2-7) в горизонтальной плоскости; форма 3

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

описывала кручение балки. А выше 4-я и 5-я формы варьировали в зависимости от шага поперечных ребер жесткости. Колебания первой формы имеют низшую

частоту, по мере возрастания номера формы, частота собственных колебаний увеличивается.

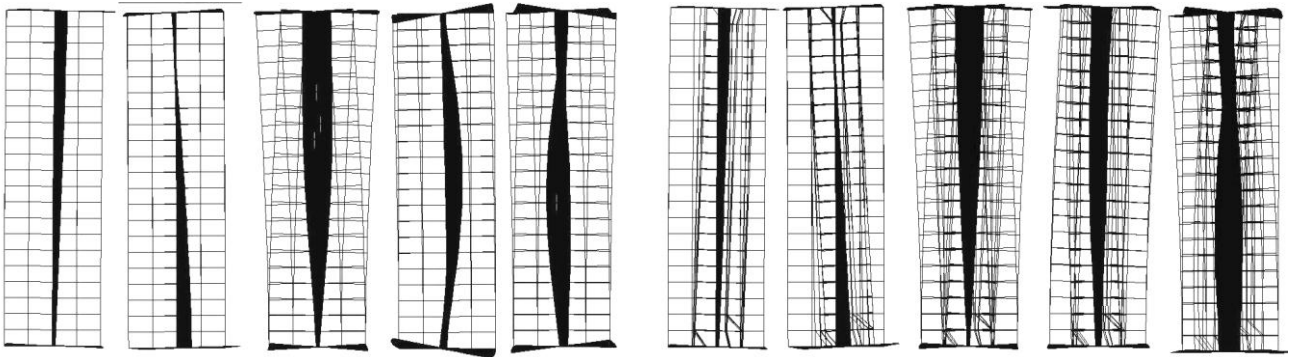


Рис. 2 Собственные формы колебаний балки без поперечных ребер жесткости (вид сбоку)

Рис. 3 Собственные формы колебаний балки с поперечными ребрами жесткости, шаг 2м (вид сбоку)

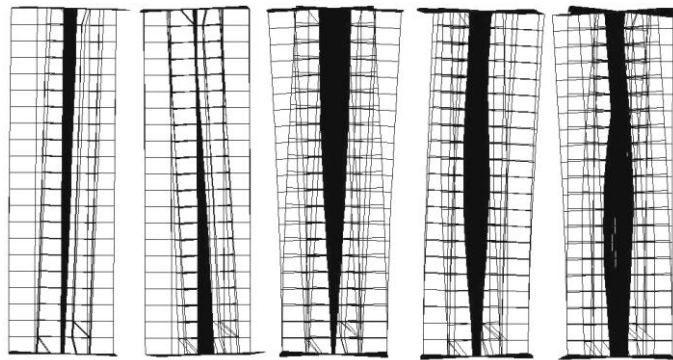


Рис. 4 Собственные формы колебаний балки с поперечными ребрами жесткости, шаг 3м (вид сбоку)

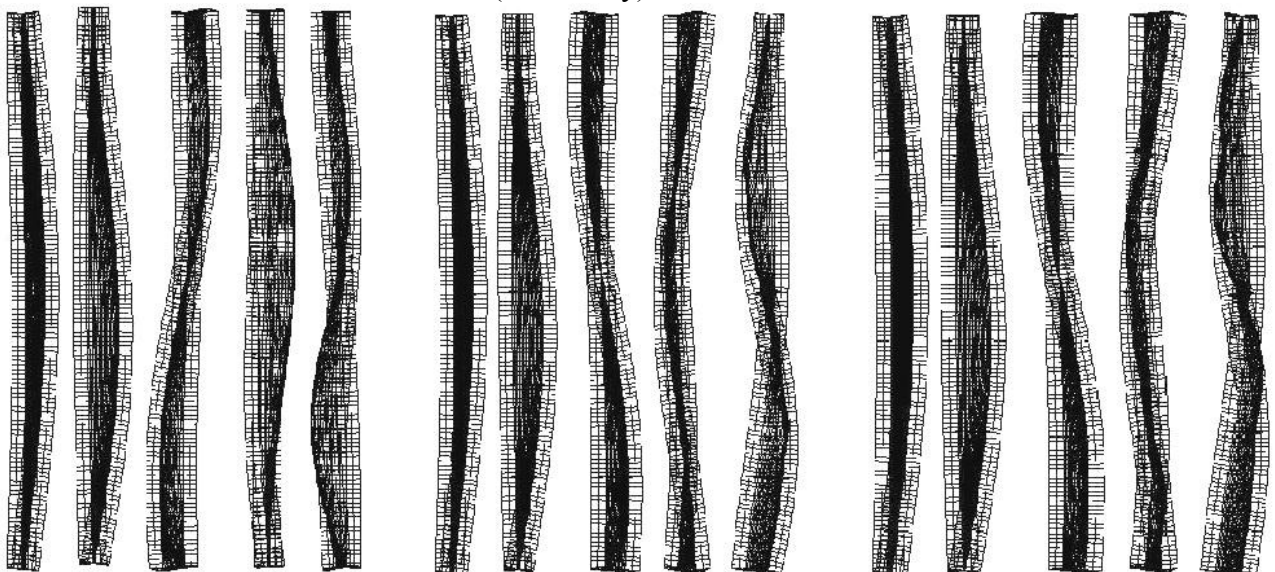


Рис. 5 Собственные формы колебаний балки без поперечных ребер жесткости (вид сверху)

Рис. 6 Собственные формы колебаний балки с поперечными ребрами жесткости (вид сверху)

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

поперечними ребрами
жесткости, шаг 2м (вид
сверху)

Рис. 7 Собственные
формы колебаний балки с
поперечными ребрами

жесткости, шаг 3м (вид
сверху)

При увеличении угла наклона оси, собственные частоты (см. рис. 8-13) формы 1 плавно увеличиваются, формы 2 – уменьшаются, формы 3, 4 и 5 изменяются нелинейно.

При добавлении поперечных ребер жесткости, частоты 1-й собственной формы уменьшаются, а частоты форм 2-5 увеличиваются.

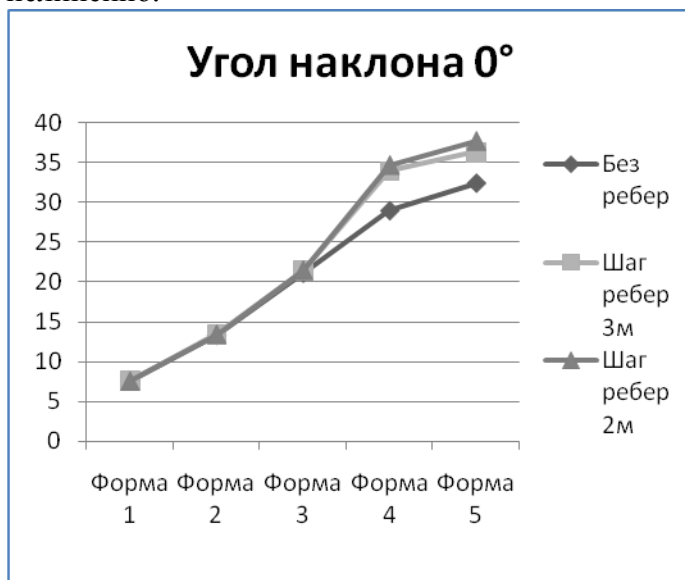


Рис. 8 Собственные частоты колебаний балки. Угол наклона оси 0°



Рис. 9 Собственные частоты колебаний балки. Угол наклона оси 5°

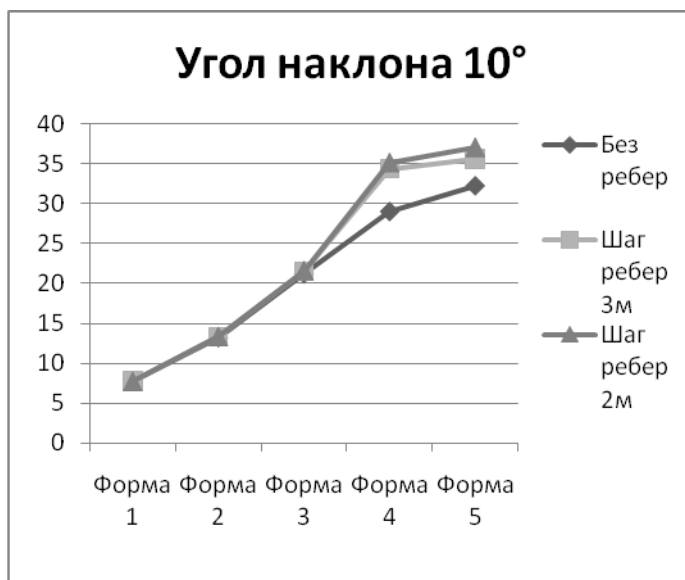


Рис. 10 Собственные частоты колебаний балки. Угол наклона оси 10°



Рис. 11 Собственные частоты колебаний балки. Угол наклона оси 15°



Рис. 12 Собственные частоты колебаний балки. Угол наклона оси 20°



Рис. 13 Собственные частоты колебаний балки. Угол наклона оси 24°

Выводы из исследования и перспективы дальнейшего развития в данном направлении. Исходя из результатов исследования можно сделать вывод о том, что изменение угла наклона оси стальных сварных балок открытого сечения не оказывает существенного влияния на

первые три формы собственных колебаний. Однако в формах 4 и 5 возникают существенные изменения, чему способствует возникновение дополнительной скатной составляющей нагрузки при повышении угла наклона балки

Список использованных источников

1. Кущенко, В. Н., Губарев, М. В. Анализ причин аварий строительных конструкций конвейерных галерей в условиях длительной эксплуатации [Текст]: Статья. / В. Н. Кущенко, М. В. Губарев – Металлические конструкции №3/том 18/2012. – с. 209–218.
2. СНиП 2.09.03-85 Сооружения промышленных предприятий / Государственный комитет СССР по делам строительства.
3. Кущенко, В. Н., Губарев, М. В. Анализ влияния динамического характера технологической нагрузки на напряженно-деформированное состояние пролетного строения решетчатой конвейерной галереи [Текст]: Статья. / В. Н. Кущенко, М. В. Губарев – Металлические конструкции, №4/том 19/2013, с. 225–234
4. Soltani, M., Asgarian, B., Mohri F. “Finite element method for stability and free vibration analyses of non-prismatic thin-walled beams” [Текст]: Статья. / M. Soltani, B. Asgarian, F. Mohri – Thin Walled Structures №82/2014 – с. 245-261
5. Ним, А.Д., Динамические воздействия ленточных конвейеров на несущие строительные конструкции [Текст]: Автореферат диссертации. / А.Д. Ним – Екатеринбург: 2002
6. Горев В.В. Металлические конструкции. том 3 Специальные конструкции и сооружения / В.В. Горев – М.: Высшая школа, 2002. - 543 с.

Волкова Виктория Евгеньевна, д.т.н., проф., кафедра «Строительства, геотехники и геомеханики», ГВУЗ «Национальный горный университет» drvev@mail.ru

Смолий Илья Сергеевич, аспирант, кафедра «Строительства, геотехники и геомеханики», ГВУЗ «Национальный горный университет», sebrle@bk.ru

Volkova Viktorija Evgeniyevna, Dr. Sci., professor, Department of construction, geotechnics and geomechanics, SHEI "National Mining University", Dnipropetrovsk, Ukraine drvev@mail.ru

Illia Smolii, post-graduate student, Department of construction, geotechnics and geomechanics, SHEI "National Mining University", Dnipropetrovsk, Ukraine sebrle@bk.ru

Стаття прийнята 22.04.2015г.

УДК 665.775:544.777+691.168

ВПЛИВ ДОБАВКИ ПОЛІМЕРНОГО ЛАТЕКСУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІТУМУ ТА АСФАЛЬТОБЕТОНУ

Канд. техн. наук С.В. Оксак

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ ПОЛИМЕРНОГО ЛАТЕКСА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БИТУМА И АСФАЛЬТОБЕТОНА

Канд. техн. наук С.В. Оксак

INFLUENCE OF POLYMER LATEX ADDITIVE ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BITUMEN AND ASPHALT CONCRETE

Cand. of techn. sciences S. Oksak

В статті розглянуто можливість використання полімерного латексу Butonal NS 198 для модифікації нафтового бітуму. Визначено оптимальні режими суміщення бітуму та латексу Butonal NS 198. Досліджені фізико-механічні властивості асфальтобетонів різних гранулометричних типів на традиційному бітумі та бітумі з добавкою полімерного латексу Butonal NS 198. Визначено вплив добавки полімерного латексу Butonal NS 198 на основні властивості бітуму БНД 60/90 та фізико-механічні властивості асфальтобетонів.

Ключові слова: бітум, полімерний латекс Butonal NS 198, модифікація, асфальтобетон, фізико-механічні властивості

В статье рассмотрена возможность использования полимерного латекса Butonal NS 198 для модификации нефтяного битума. Определены оптимальные режимы совмещения битума и латекса Butonal NS 198. Исследованы физико-механические свойства асфальтобетонов различных гранулометрических типов на традиционном битуме и битуме с добавкой полимерного латекса Butonal NS 198. Определено влияние полимерного латекса Butonal NS 198 на основные свойства битума БНД 60 90 и физико-механические свойства асфальтобетонов.

Ключевые слова: битум, полимерный латекс Butonal NS 198, модификация, асфальтобетон, физико-механические свойства

The influence of polymer latex Butonal NS 198 on the properties of petroleum bitumen BND 60/90. The optimum combination of modes of bitumen and latex Butonal NS 198. The effect of mixing time on the properties of the modified binder (penetration at 25 °C, softening point, brittleness temperature and elasticity). The effect of the polymer latex on the binder optimal quantity and properties of asphalt concrete types different grading. The optimal quantity of binder increases with decreasing content of rubble, that the transition from asphalt type A to type G. The adding of polymer latex in bitumen BND 60/90 increases the strength of asphalt concrete at 20 i 50 °C, and the strength at 0 °C is decreases slightly. Established water resistance and strength characteristics increase of asphalt concrete with Butonal NS 198, which indicates an increase in the durability of the road surface with the use of this material.

Keywords: bitumen, polymeric latex Butonal NS 198, modification, asphalt concrete, physical and mechanical properties

Вступ.

Складні природно-кліматичні умови, істотно за останні роки збільшення вантажних перевезень автотранспортом потребують якісно нових рішень по будівництву й утриманню дорожнього покриття, а саме технологіям, що значно підвищують його якість та збільшують міжремонтний період.

Однією з таких технологій є застосування бітумів модифікованих полімерами різних видів. За обсягами застосування полімери розміщуються в такому порядку: термоеластоласти типу стирол-бутадієн-стиролу (SBS); термоласти типу етилен-вініл-ацетат (EVA), поліізобутилен, поліпропілен, різноманітні блоксополімери; полімерні латекси (SBR); тер полімери типу етіленгліциділакрілата (Elvaloy) [1].

Ця технологія масово використовується з 1960-х років за кордоном [2] і в останні роки, усе більше поширюється в нашій країні.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.

Модифікація бітумів синтетичними полімерами є досить складною технологією, що потребує застосування складного обладнання (колоїдні млини, гомогенезатори і т.д.) для забезпечення необхідної однорідності та якості модифікованого в'язучого [3].

Тому застосування для модифікації бітумів полімерних латексів є дуже перспективним напрямком, оскільки латекси вміщують в своєму складі диспергований полімер і тому легко суміщаються з бітумом на відміну від інших різновидів полімерів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Протягом багатьох років стирол-бутадієнові дисперсії (SBR-HSL), відомі під маркою Butonal, сприяють значному поліпшенню експлуатаційних властивостей дорожніх бітумів (гаряче та холодне укладання). У Германії і США продукти, що реалізуються під маркою Butonal, є стандартними матеріалами для модифікації бітумів. Латекси з низькою температурою склування здатні забезпечити додаткову

гнучкість при низьких температурах і додаткову зсувостійкість асфальтобетону при високих температурах. Однак враховуючи, що вітчизняні дорожні бітуми відрізняються від тих, що використовуються в США та країнах Західної Європи питання вивчення впливу таких модифікаторів на властивості дорожніх бітумів, що застосовуються в Україні не вирішене.

Застосування синтетичних латексів дозволяє підвищити міцність, асфальтобетону на розтяг, зсувостійкість [4]. Добавка Butonal значною мірою підвищує в'язкість бітумного в'язучого. Міцність на розтяг асфальтобетону при цьому зростає в 5- 6 раз, а ударна міцність при низьких температурах підвищується удвічі, що дозволяє понизити товщину шару покриття на 30-45 %, зберігаючи необхідну працездатність конструкції.

Полімерні латекси застосовувались для покращення властивостей залишкових бітумів [5]. Вихідні залишкові бітуми не відповідали вимогам, що висуваються до нафтових дорожніх бітумів [6], але добавка 2-3 % полімерного латексу дозволяє отримати в'язуче, що повністю відповідає вказаним вимогам.

Визначення мети та задачі дослідження.

Метою цієї роботи є дослідження впливу полімерного латексу Butonal NS 198 на властивості нафтового дорожнього бітуму БНД 60/90, а також асфальтобетонів різних гранулометричних типів згідно з [7].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити оптимальний режим суміщення нафтового бітуму та полімерного латексу Butonal NS 198;
- встановити оптимальний вміст модифікованого бітуму в складі асфальтобетонів різних гранулометричних типів;
- вивчити фізико-механічні властивості асфальтобетонів на основі традиційного бітуму та бітуму з добавкою полімерного латексу Butonal NS 198.

Основна частина дослідження.

В якості об'єкту дослідження обрано нафтовий дорожній бітум найбільш розповсюдженої марки БНД 60/90, що

використовується на всій території України та асфальтобетони різних гранулометричних типів.

Полімерний модифікатор (латекс) серії Butonal NS 198 (катионний) виробництва BASF (США) належить до термоеластопластів типу СБР і є водною дисперсією сополімерів бутадієн - стиролу, які містять конгломеровану сірку. Латекс Butonal NS 198 завдяки наявності катионного емульгатору, окрім модифікації бітуму, покращує зчеплення бітумів з мінеральними матеріалами.

Об'єднання бітуму та полімерного латексу здійснювалося при температурі 180 °С, кількість латексу Butonal NS 198 складала 4 % (введення виконується дуже обережно, щоб не допустити спінення бітуму при його контакті з водою, яка міститься в латексі). Для визначення оптимального часу змішування досліджено вплив часу перемішування на властивості

модифікованого в'язучого. Отримані дані вказують на те, що вже після 0,5 години перемішування, ці показники практично не змінюються (рис. 1 та 2).

Тому час перемішування, що рекомендується виробником (1,5-2,5 години), можна дещо скоротити (до 1 години), що дозволить забезпечити повну розчинність полімерного латексу Butonal NS 198 в бітумі без зайвих енерговитрат та витрат часу. Скорочення часу перемішування скорочує час перебування бітуму у зоні високих температур (180 °С), що зменшує ступінь старіння бітуму та бітумополімерного в'язучого в цілому.

Властивості вихідного бітуму БНД 60/90 та бітуму модифікованого 4 % латексу Butonal NS 198, отриманого перемішуванням протягом 1 години, та приведені в табл.1. Отримане бітумополімерне в'язуче відповідає вимогам [8] для марки БМП 40/60-56 окрім температури розм'якшеності.

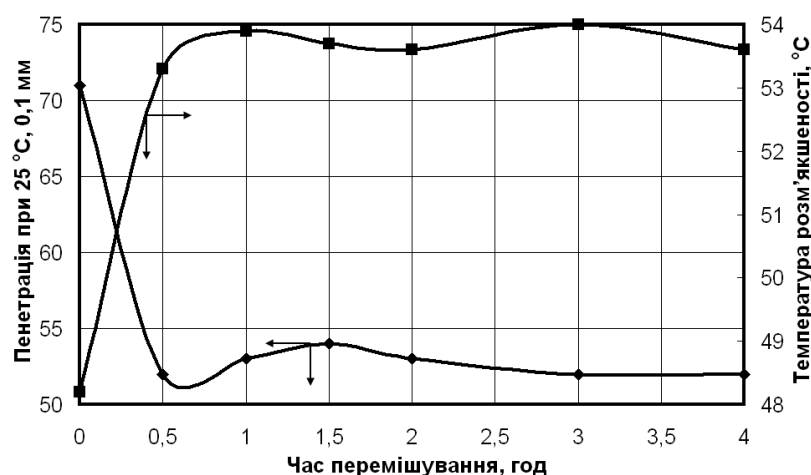


Рис. 1. Вплив часу перемішування на властивості отриманого модифікованого в'язучого

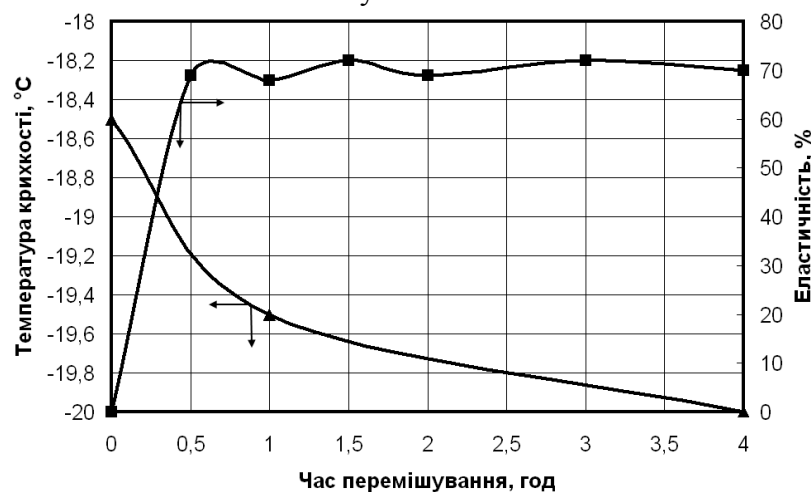


Рис. 2. Вплив часу перемішування на еластичність та температуру крижкості отриманого модифікованого в'язучого

Таблиця 1 – Властивості бітуму та бітуму, модифікованого полімером

Показники	В'язуче	
	БНД 60/90	БНД 60/90+ 4 % Butonal NS 198
Пенетрація при температурі 25 °С, 0,1 мм	71	53
Температура розм'якшеності, °С	48,2	53,9
Температура крихкості, °С	-18,5	-19,5
Розтяжність при температурі 25 °С, см	>100	>100
Еластичність, %	0	65

Для об'єктивної оцінки фізико-механічних властивостей асфальтобетонів необхідно вивчати такі бетони, які містять оптимальний вміст в'язучого [9]. При оптимальному вмісті в'язучого асфальтобетони характеризуються максимальними значеннями фізико-механічних властивостей.

Залежність оптимального вмісту в'язучого від його виду досліджувалась на асфальтобетоні типу Б та приведена на рис. 3-4. Для порівняння були приготовані суміші на чистому бітумі БНД 60/90, на бітумі модифікованому 4 % Butonal NS 198.

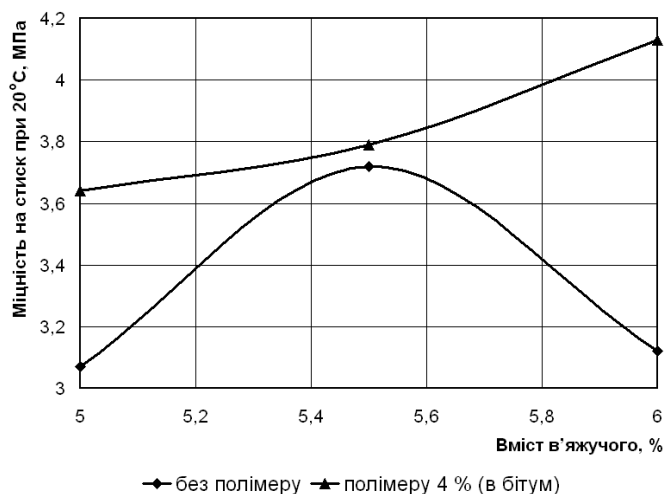


Рис. 3. Вплив вмісту в'язучого на міцність асфальтобетону та асфальтополімербетону типу Б при 20 °С

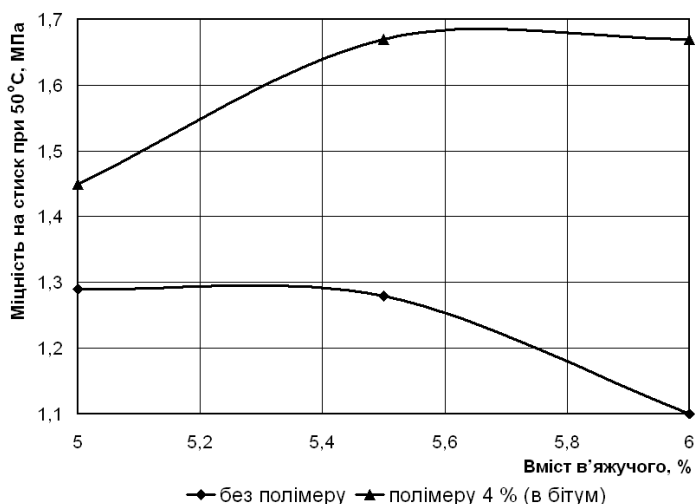


Рис. 4. Вплив вмісту в'язучого на міцність асфальтобетону та асфальтополімербетону типу Б при 50 °С

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

Оптимальний вміст в'язучого з додаванням полімеру в бітум підвищується, що може бути пов'язане зі збільшенням в'язкості в'язучого.

Схожа ситуація спостерігається і для типів А, В і Г. Таким чином, оптимальний вміст в'язучого при введенні полімеру підвищується наступним чином (табл. 2): для типу А: бітум БНД 60/90 – 5,0 %; при

модифікації бітуму 4 % Butonal NS 198 – 5,4 %; для типу Б: бітум БНД 60/90 – 5,5 %; при модифікації бітуму 4 % Butonal NS 198 – 6,0 %; для типу В: бітум БНД 60/90 – 6,0 %; при модифікації бітуму 4 % Butonal NS 198 – 6,5 %; для типу Г: бітум БНД 60/90 – 6,5 %; при модифікації бітуму 4 % Butonal NS 198 – 7,0 %.

Таблиця 2 – Фізико-механічні властивості асфальтобетону різних типів з оптимальним вмістом в'язучого

Тип а/б	В'язуче		ρ , кг/м ³	W, %	R ₂₀ , МПа	R ₅₀ , МПа	R ₀ , МПа	K ₁₅	K ₃₀	r ₅₀ , МПа	τ ₅₀ , МПа
	склад	вміст, %									
А	БНД 60/90	5,0	2331	3,8	2,99	0,97	9,24	0,80	0,73	0,092	0,111
	(БНД 60/90 + 4 % Butonal)	5,4	2338	3,4	3,92	1,24	9,10	0,84	0,78	0,132	0,153
Б	БНД 60/90	5,5	2365	2,8	3,72	1,28	10,34	0,80	0,76	0,114	0,148
	(БНД 60/90 + 4 % Butonal)	6,0	2370	2,3	4,13	1,67	9,51	0,91	0,85	0,176	0,207
В	БНД 60/90	6,0	2367	2,7	4,10	1,67	10,06	0,87	0,82	0,113	0,143
	(БНД 60/90 + 4 % Butonal)	6,5	2373	2,0	4,83	1,98	9,85	0,92	0,86	0,175	0,211
Г	БНД 60/90	6,5	2322	2,3	3,92	1,48	10,42	0,89	0,86	0,109	0,141
	(БНД 60/90 + 4 % Butonal)	7,0	2330	1,6	4,20	1,93	9,28	0,94	0,89	0,168	0,208

Із введенням полімеру в бітум БНД 60/90 підвищується міцність асфальтобетонів при 20 і 50 °С, а міцність при 0 °С дещо знижується, це може бути обумовлено невеликим зниженням температури крихкості бітуму при введенні в нього полімеру. При введенні латексу у асфальтобетонну суміш показники асфальтобетону також зростають, але менш інтенсивно. Всі асфальтобетони за своїми властивостями повністю відповідають вимогам [7].

Стандартні показники міцності на стиск при 20 і 50 °С не завжди об'єктивно характеризують зсувостійкість асфальтобетону. У зв'язку з цим, були проведені дослідження за визначенням міцності на розтяг по твірній і на зсув при крученні асфальтобетонів. Ці показники є більш чутливими до підсилюючої дії полімеру.

Зсувостійкість асфальтобетону є найважливішим показником якості

асфальтобетонного покриття. Висока зсувостійкість асфальтобетону попереджає утворення на покритті постійних деформацій у вигляді хвиль, колій, напливів, і таким чином забезпечує рівність дорожнього покриття. У країнах Західної і Центральної Європи попередження пластичної деформації асфальтобетонних покриттів розглядається як найважливіше завдання, над вирішенням якої працюють вчені і виробничники. В Україні пластичні деформації є поширеним видом руйнування асфальтобетонних покриттів.

Із введенням полімеру міцність асфальтобетону на зсув (τ₅₀) і розтяг по твірній (r₅₀) підвищуються (табл. 2).

Добавка полімеру також підвищує водостійкість асфальтобетону, так коефіцієнт водостійкості асфальтобетону на бітумі БНД 60/90 складає 0,80, а у асфальтобетону на бітумі модифікованому 4 % латексу – 0,90.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.

Застосування полімерного латексу Butonal NS 198, для модифікації бітумів покращує їх властивості, а саме підвищує консистенцію, підвищує температуру розм'якшення та дещо знижує температуру крихкості. Це призводить до розширення інтервалу пластичності бітуму. Зростає когезія бітуму та з'являється еластичність.

Використання латексу Butonal NS 198 є менш енергоємним у порівнянні з іншими полімерними добавками завдяки тому, що полімер вже диспергований і потребує менше часу перемішування до повного об'єднання з бітумом.

Введення латексу Butonal NS 198 в бітум призводить до підвищення оптимального вмісту в'язучого (в середньому на 0,5 %), що зв'язано зі збільшенням в'язкості самого в'язучого.

Оптимальна кількість в'язучого збільшується зі зменшенням вмісту щебеню, тобто при переході від асфальтобетону типу А до типу Г.

Застосування бітумів модифікованих латексами для виготовлення асфальтобетонів призводить до істотного і прогнозованого зростання показників міцності асфальтобетонів: міцності на стиск, зсувостійкості та міцності на розтяг.

Показники міцності на зсув на розтяг по твірній в більшій мірі, ніж показники міцності на стиск чутливі до вмісту в них полімеру: коефіцієнт підсилюючої дії 4 % полімеру (для типу Б) по міцності на стиск при 50 °С дорівнює 1,30, по опору на зсув та розтяг – 1,40 та 1,54 відповідно.

Добавка катіонного латексу Butonal NS 198 підвищує водостійкість асфальтобетону за рахунок наявності у латексі катіонного емульгатору та покращує зчеплюваність бітуму з поверхнею мінеральних матеріалів.

Список використаних джерел

1. Золотарев В.А. Битумы, модифицированные полимерами, и асфальтополимербетоны [Текст] / В.А. Золотарев // Дорожная техника. – 2009. - № 1. - С. 16-23.
2. Zhu J. Polymer modification of bitumen: advances and challenges [Текст] / Zhu J., Birgisson B., Kringos N. // European Polymer Journal. – 2014. – Vol. 54. - P. 18-38.
3. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы и битумы с добавками в дорожном строительстве [Текст] /перевод с франц. / Под редакцией д.т.н. В.А. Золоторёва, д.т.н. В.И. Братчуна. - Харьков: ХНАДУ, 2003.- 229 с.
4. Оцінка впливу модифікатора бітуму Бутонал NS 198 на підвищення довговічності асфальтобетонного покриття [Текст] / Макарчев О.О., Мозговий В.В., Бесараб О.М., Онищенко А. М. // Дороги і мости. Збірник наукових статей. ДерждорНДІ. - 2006. - № 5. - С. 275-288.
5. Al-Ameri M. Modification of residual bitumen from orhovytyska oil by butonal polymeric latexes [Текст] / М. Al-Ameri, О. Grynshyn, Y. Khlibyshyn // Chemistry & chemical technology. – 2013. - Vol. 7, № 3. - P. 323-326.
6. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия: ДСТУ 4044-2001. [Чинний від 2002-01-01]. – К.: Держстандарт. 2001. – 15 с. (Національний стандарт України).
7. Будівельні матеріали. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон дорожній і аеродромний: ДСТУ Б В.2.7-119:2011. [Чинний від 2012-10-01]. – К.: Мінрегіон України, 2012. – 42 с. (Національний стандарт України).
8. Будівельні матеріали. Бітуми дорожні, модифіковані полімерами. Технічні умови: ДСТУ Б В.2.7-135:2007. [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 26 с. (Національний стандарт України).
9. Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны [Текст] / И.А. Рыбьев. - М.: Высш. шк., 1969. - 399 с.

Рецензент: д.т.н., професор С.М. Толмачова

Оксак Сергій Володимирович канд. техн. наук, доцент кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківський національний автомобільно-дорожній університет. Тел.: (057) 707-37-26. E-mail: vvt@khadi.kharkov.ua

Oksak Sergiy Volodymyrovych cand. of techn. sciences, associate professor department of technology road-construction materials Kharkiv National Automobile and Highway University. Tel.: (057) 707-37-26. E-mail: vvm@khadi.kharkov.ua

Статья поступила 17.04.2015

УДК 691.624.01:625.7

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ФОРМИРОВАНИИ ПЕРВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ ГРУНТОМАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА

Н. В. Грано

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ УЯВЛЕНЬ ПРО ФОРМУВАННЯ ПЕРВИННОЇ СТРУКТУРИ ГРУНТОМАТЕРІАЛІВ У ПРИСУТНОСТІ СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРУ

Н. В. Грано

DEVELOPMENT OF THEORETICAL IDEAS ABOUT FORMING OF PRIMARY STRUCTURE OF SOIL MATERIALS IN THE PRESENCE OF SUPERPLASTICIZER

N. V. Grano

Установлены закономерности формирования первичной структуры твердеющей грунтоминеральной смеси с комплексной химической добавкой. На основании физико-химических методов исследования подтверждена теоретическая гипотеза структурообразования в предлагаемых композициях.

Ключевые слова: *грунтотеріали, мінеральні вяжучіе, структурооброзование, комплексная химическая добавка, продукты гидратации, микроструктура, электронномикроскопические исследования.*

Встановлені закономірності формування первинної структури грунтомінеральної суміші в присутності комплексної хімічної домішки. На основі фізико-хімічних методів дослідження підтверджена теоретична гіпотеза структуроутворення в запропонованих композиціях.

Ключові слова: *грунтотеріали, мінеральні в'язучі, структуроутворення, комплексна хімічна домішка, продукти гідратації, микроструктура, електронномікроскопічні дослідження.*

The aim of the article is to determine the patterns of formation of primary structure of hardening soil mineral mixture with complex chemical admixture.

Concerning the fact that soil materials at all stages of their production and exploitation are the objects of colloid chemistry, and working out theoretical ideas, the author suggests heading for the ideas of potential determining ions (PDI) on the surface of structure forming elements and formation of elementary contacts between them.

The author comes to the conclusion that the initial solidity of fortified soil should be rationally determined by the number of single electro heterogeneous (EHG) and electro homogenous (EHomG) contacts between soil parts.

The article formulates the main theoretical statements of mechanism of hardening of loamy soil, fortified by cement or lime with presence of superplasticizer of complex action and slag.

The theoretical hypothesis of structure formation in the suggested compositions is proved by electronic microscopical researches of the structure.

The author produces and analyses comparative photographs of microstructure of fortified soil forms without admixture and with presence of superplasticizer admixture.

Keywords: soil materials, mineral binding materials, structure formation, complex chemical admixture, aqutation products, microstructure, electronic microscopic researches

Введение

В современном обществе растет тенденция увеличения стоимости строительных материалов, их дефицит. Ценообразующим фактором для их на мировом рынке стала стоимость энергии.

Материалы, производимые на предприятиях с повышенной степенью переработки сырьевых ресурсов, нуждаются в большом количестве энергии.

В связи с этим в технологии строительных материалов специалисты проявляют повышенный интерес к использованию местных материалов (грунт, песок). При производстве грунтоматериалов на основе минеральных вяжущих стоит вопрос использования различных добавок, которые дают возможность оптимизировать структуру, свойства грунтоматериалов и технологию их изготовления.

Возможность регулирования составом и свойствами, управления кинетикой гидратации и формирования структуры на микро и макроуровнях сделали добавки необходимыми компонентами.

Определенный метод закрепления грунта в одних условиях дает хорошие результаты, в иных условиях может привести к малоэффективным или негативным результатам, так как большинство грунтов достаточно восприимчиво реагируют на разные химические воздействия.

Достаточно важно установить закономерности структурообразования на всех этапах твердения грунтоминеральной смеси.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

В [1-3] приведены результаты исследований авторов по улучшению технико-эксплуатационных показателей грунтоматериалов. В результате исследований авторами был получен оптимальный состав грунтоминеральной смеси с комплексной химической добавкой, обеспечивающий экономический и

технологический эффекты в том числе, формирование более прочной структуры, повышение морозостойкости и водонепроницаемости грунтоматериалов [4, 5].

Предложенные композиции относятся к области строительных материалов и могут быть использованы как для закрепления грунтов под сооружения промышленного и гражданского строительства, так и для устройства конструктивных слоев одежды автомобильных дорог и аэродромов.

Однако, полученные в [1-3] технологические эффекты не были достаточно глубоко проанализированы, не раскрыты механизмы формирования первичной структуры грунтоматериалов.

Учитывая, что грунтоматериалы на всех стадиях производства и эксплуатации являются объектами коллоидной химии, соответственно к ним приемлемы её законы и закономерности.

Исходя из этого, при разработке теоретических представлений о твердении грунтоминеральных смесей предложено ориентироваться на фундаментальные положения коллоидной химии и физико-химической механики дисперсных систем [6, 7].

Цель работы

Установить закономерности формирования первичной структуры твердеющей грунтоминеральной смеси с комплексной химической добавкой.

На основании физико-химических методов исследования подтвердить теоретическую гипотезу структурообразования в предлагаемых композициях.

Результаты исследований

При разработке теоретических представлений о твердении грунтоматериалов мы ориентировались на представления [6, 8, 9] о потенциалопределяющих ионах (ПОИ) на поверхности структурообразующих

элементов и образование между ними элементарных контактов.

Механизм нарастания прочности в закрепленных связных грунтах достаточно сложен. В том числе он зависит от заряда поверхности частиц, который может отличаться по знакам. Для объяснения образования точечных контактов, которые определяют прочность грунта, закрепленного известью или цементом, мы используем теорию, разработанную А.Н. Плугиным [8]. Прочность материала определяется количеством единичных электрогетерогенных (ЭГК) и электрогомогенных (ЭГомК) контактов [7]. Для частиц грунта, в составе которых находятся глинистые минералы, с характерным для них положительным поверхностным потенциалом (потенциал определяющие ионы ПОИ), противоионами

(ПРИ) будут выступать гидроксильные ионы, которые несут отрицательный заряд. Для кварцевых частиц, ПОИ которых имеют отрицательный заряд, противоионами будут положительно заряжены ионы кальция.

При введении ПАВ типа суперпластификатор «Релаксол» в грунтоминеральную смесь (грунт, 10% цемент или известь, 30% доменный гранулированный шлак), происходит разрушение коллоидных агрегатов грунта, на которых адсорбируются молекулы ПАВ. Параллельно происходит разрушение агрегатов цемента, извести и частичное их диспергирование. В раствор выходит значительное количество ионов кальция и гидроксила, которые на начальном этапе увеличивали прочность закрепленного грунта по схеме (рис. 1).

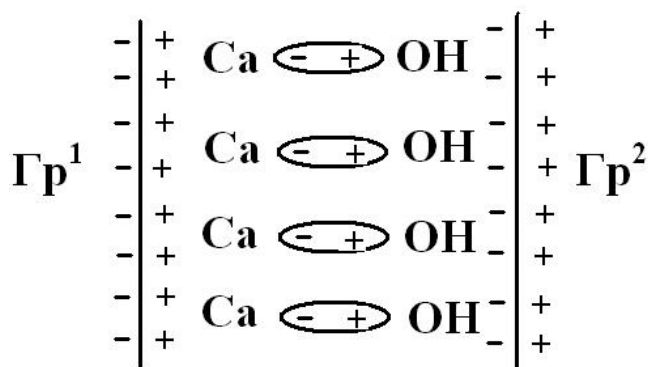


Рис. 1. Схема образования ЭГК между частицами в глинистых грунтах

Гр¹ – частица с отрицательным поверхностным зарядом;

Гр² – частица с положительным поверхностным зарядом.

Вероятно, что при минимизации количества свободной и физико-химически связанной воды за счет введения ПАВ и последующем уплотнении модифицированного грунта дорожными катками с давлением до 40 МПа, в промежутках между частицами будет находиться мономолекулярный слой воды. Это обусловлено тем, что давление, которое прикладывается, способствует вытеснению избытка свободной воды, и последующему её испарению. Частицы грунта при этом могут сближаться на расстояние:

размер иона Ca²⁺ + размер диполя воды + размер иона OH⁻

$$1 \text{ \AA} + 2,8 \text{ \AA} + 1,53 \text{ \AA} = 5,33 \text{ \AA}.$$

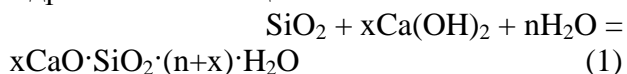
Именно такого рода контакты, которые формируются практически мгновенно, после выхода в раствор Ca(OH)₂, (сразу же после перемешивания грунта с минеральными вяжущими и химической добавкой) и количество которых достаточно велико, будут определять начальную прочность закрепленного грунта.

В последующем прочность грунта будет увеличиваться за счет прохождения всех трёх механизмов твердения извести. В начальные сроки твердения (несколько суток) будет преобладать механизм твердения, обусловленный образованием гидросиликатов. Этому будет способствовать добавленный в систему

доменный шлак, который будет связывать известь с образованием гидросиликатов.

Параллельно с этим известь в закрепленном грунте может твердеть по кристаллогидратному, гидросиликатному или карбонатному механизмам, Аналогичное мнение высказывал В.В. Охотин [10].

Во время реакции гидроксида кальция с активным кремнеземом гидравлических минеральных добавок образуется гидросиликат кальция:



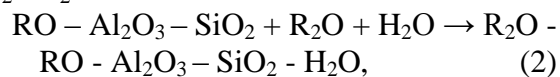
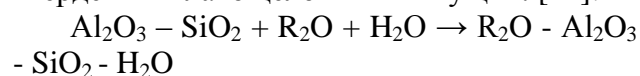
Про основной вклад этой реакции в повышении прочности закрепленных грунтов указано в работе А.К. Бируля и Н.Ф. Сасько [11].

Исходя из вышеизложенного, можно сформулировать основные теоретические положения предложенного механизма твердения суглинистого грунта, закрепленного цементом или известью в присутствии суперпластификатора комплексного действия и доменного шлака:

1. На начальном этапе приготовления и укладки смеси грунта, вяжущего, шлака и суперпластификатора происходит адсорбция суперпластификатора и перезарядка поверхности положительно заряженных участков вяжущего и тонкодисперсных частиц грунта. Это требует увеличения расхода суперпластификатора в сравнении с традиционно рекомендованной дозировкой. При этом происходит разрушение микроагрегатов глинистых частиц, из которых высвобождается лишнее количество свободной воды, которая при уплотнении системы отжимается на поверхность и испаряется. Кроме этого, облегчается уплотнение грунтоцемента за счет снижения сил трения между частицами.

2. На следующем этапе при уплотнении закрепленного грунта происходит гидролиз алита и насыщение жидкой фазы продуктами гидролиза извести. В это время происходит повторная коагуляция частиц грунта, обусловленная поступлением ионов Ca^{2+} . При этом в грунте формируется коагуляционная структура и образуются ЭГК и ЭГомК по схеме на рис. 1. Присутствие в составе добавки «Релаксол С-3Р» тиосульфата натрия и повышение щелочной

среды за счет извести спровоцирует вступление в реакцию шлаковых минералов с образованием гидроалюминатов и гидросиликатов кальция по схемам твердения шлакощелочных вяжущих. [12]:



где RO – оксиды кальция, магния и т. д.

R_2O – оксиды алюминия, железа, хрома и т. д.

За счет указанных процессов обеспечивается ранняя прочность закрепленного грунта. Добавление молотого шлака улучшает гранулометрию грунта, образуя плотный и прочный каркас.

3. Твердение извести после первых суток происходит также по карбонатному механизму, что в свою очередь вносит свой вклад в увеличение прочности закрепленного грунта. В последующем структурообразование в закрепленном этими добавками грунте обеспечивается за счет пуццолановой реакции (по формуле 1), уплотнения и упрочнения начальной коагуляционной структуры и ее перехода в кристаллизационную с образованием преимущественно ЭГК. Преобладающим становится гидросиликатный механизм структурообразования. Образующиеся при этом низкоосновные гидросиликаты уплотняют структуру, заполняя поры и капилляры в грунте.

С целью изучения фазового состава и структуры на микро- и субмикроскопическом уровнях продуктов твердения образцов закрепленного грунта был проведен комплекс независимых физико-химических методов исследований в т.ч. рентгенографический (РГ), инфракрасная спектроскопия (ИК), электронная микроскопия с дополнительным увеличением фотоснимков с помощью ПЭВМ.

Электронно-микроскопические исследования структуры закрепленного грунта, выполненные нами, дают возможность рассматривать грунтоматериалы как коллоидно-химическую систему, которая состоит из микро- и субмикроструктурных элементов,

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

не до конца прореагировавших зерен вяжущего, связанных упруго-пластичным кристаллогидратным каркасом, который состоит из субмикроскопических частиц портландита, этtringита и гидромосульфата алюмината кальция, заполненным водонасыщенным высокодисперсным гидросиликатным гелем, который состоит из глобул, образованных из

еще меньших частиц геля. Дисперсионной средой является физико-химически связанная вода (раствор гидроксида кальция).

В доказательство этого выступают следующие фото, полученные с помощью электронного сканирующего микроскопа РЭММА-102

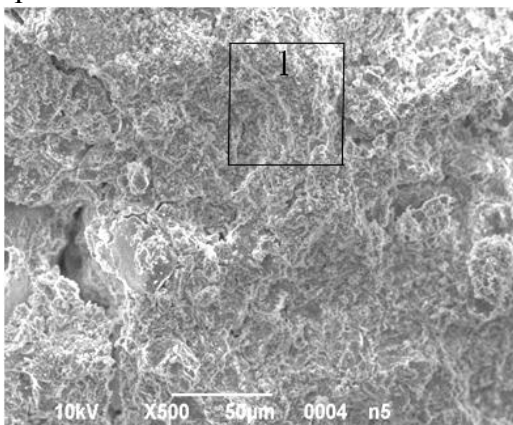


Рис. 2. Закрепленный известью грунт в присутствии химической добавки «Релаксол С-3Р».

Исследование структуры на субмикро- и надмолекулярном уровнях с размерами элементов структуры меньшими 1 мкм осуществлялись по методике

дополнительного увеличения электронно-микроскопических фотоснимков с помощью сканера с повышенной разрешающей способностью и ПЭВМ.

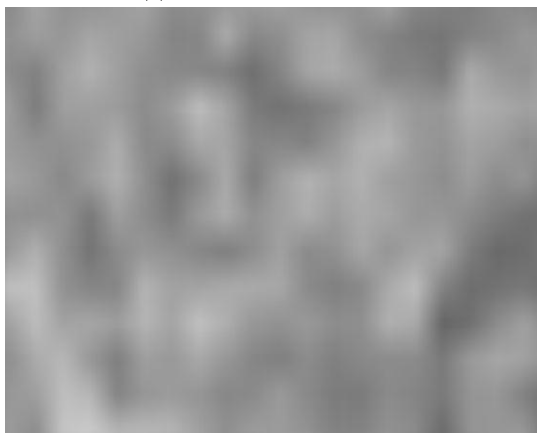


Рис. 3. Фрагмент 1, увеличен в 40 раз (результатирующее увеличение $\times 20000$).

Размер минимальных структурообразующих светлых частиц около 0,7 мкм.

На увеличенном фрагменте (рис. 2.) наблюдаются мелкие частицы, которые покрывают образования неопределенной формы. Из рисунка видно, что грунтоматериал является коллоидной

дисперсной системой, дисперсная фаза которой состоит из маленьких частичек с прослойками жидкости между ними, часть из которых скоагулировала, образовав флоккулы.

Нами были проведены сравнительные исследования микроструктуры образцов закрепленного грунта (рис. 4, рис.5, рис. 6).

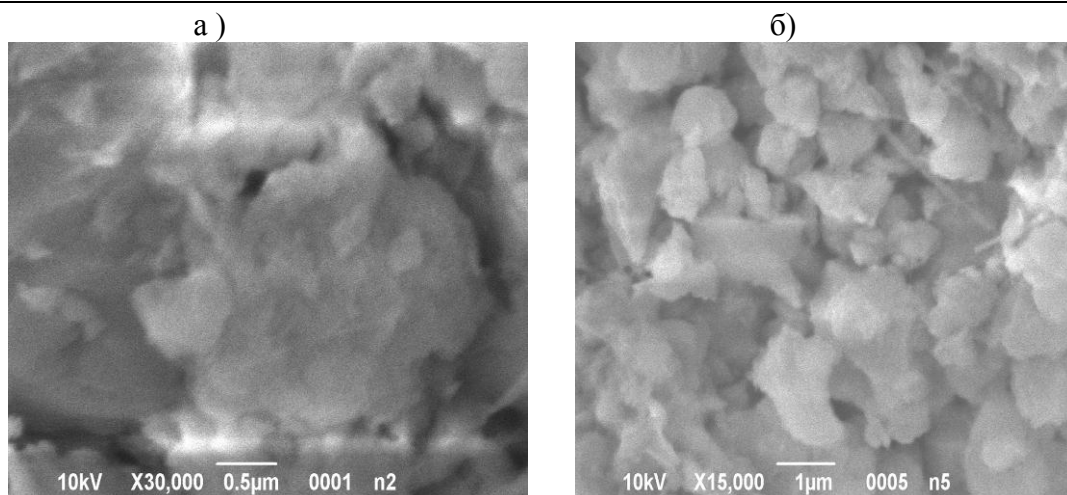


Рис. 4. Микроструктура ґрунта, закріпленого известью с добавлением комплексной химической добавки «Релаксол С-3Р»:
а) возраст - 14 суток; б) возраст - 180 суток.

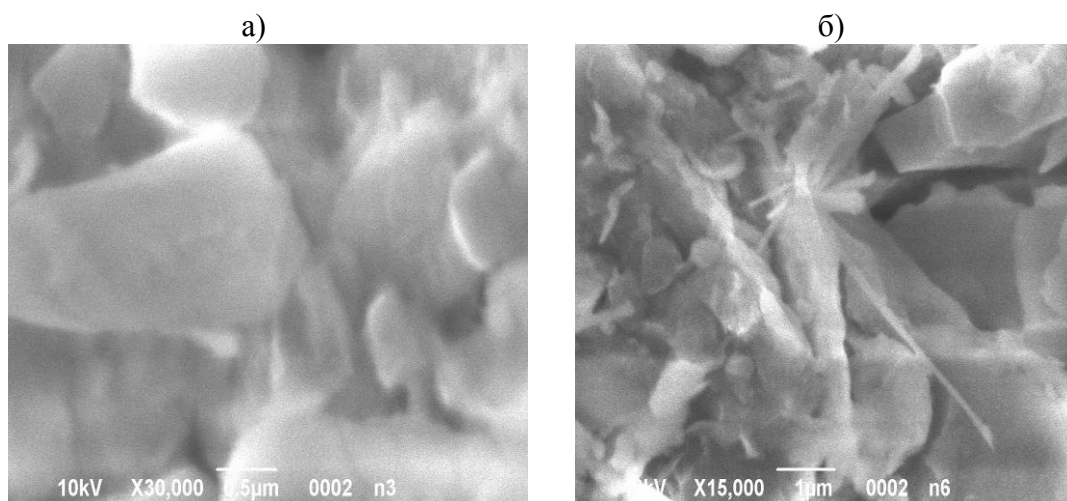


Рис. 5. Микроструктура ґрунта, закріпленого известью без добавления комплексной химической добавки «Релаксол С-3Р»:
а) возраст - 14 суток; б) возраст - 180 суток.

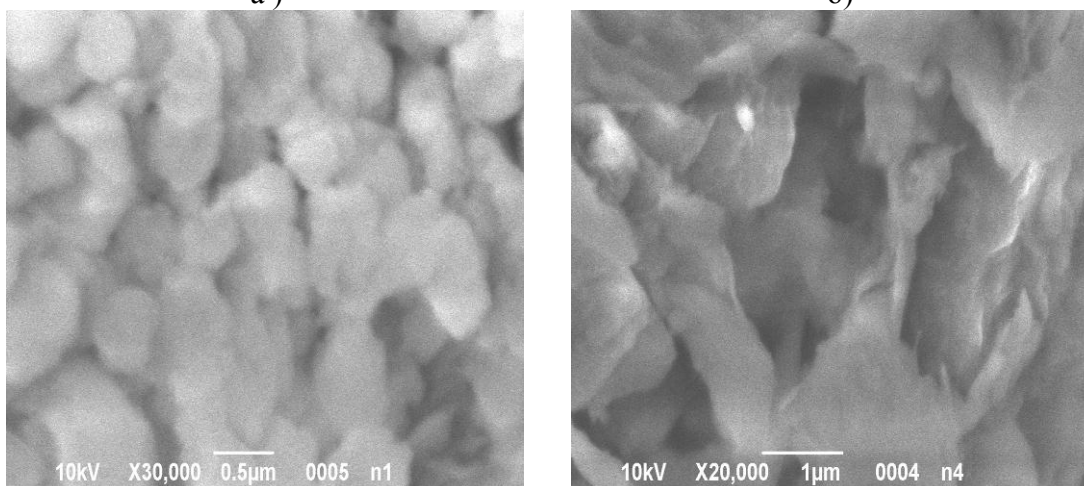


Рис. 6. Микроструктура ґрунта, закріпленого известью +доменный шлак 30% в присутствии комплексной химической добавки «Релаксол С-3Р»:
а) возраст - 14 суток; б) возраст - 180 суток.

Введение добавки «Релаксол С-3Р» в грунтоминеральную смесь препятствует образованию фазовых контактов между кристаллами. Адсорбционный слой пластификатора, значительно замедляет процесс роста зародышей $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и провоцирует увеличение их дисперсности.

Активизация процессов гидратации в композиции «грунт + известь 10% + шлак 30% + добавка Релаксол С-3Р 1,5%» и «грунт + известь 10% + Релаксол С-3Р 1,5%» солями тиосульфата и роданида натрия сужают диапазон микропор в сторону меньших размеров, увеличивается количество контактов между новообразованиями.

Микроструктура камня исследованных образцов плотная, что свидетельствует о высокой степени гидратации С3S. Контакты между зёрнами в значительной степени обеспечиваются за счет пластинчатых гексагональных кристаллов АFm-фаз.

Отдельные иглоподобные или призматические кристаллы мы относим к эттрингиту. Портландит представлен в виде плотноупакованных крупных пластинчато-таблитчатых кристаллов, кристаллы гидромонульфатоалюмината кальция имеют пластинчато-гексагональную форму. Светлые участки мы относим к гелю или феррогелю, которые покрывают тонким слоем пластины гидросульфатоалюминатных кристаллов и, вероятно, являются их прослойками.

Выводы:

В работе установлено, что добавление доменного гранулированного шлака и суперпластификатора «Релаксол С-3Р», дает возможность уменьшить количество воды, исключив свободную воду, которая мешает качественному уплотнению закрепленного грунта. При сближении частиц грунта и вяжущего через тонкую пленку воды

структурообразование будет протекать за счет образования электрогетерогенных и электрогомогенных контактов, ускорения пуццолановой реакции между известью и активным кремнеземом грунта и шлака, карбонатного твердения извести, а также шлакощелочной реакции. Образовавшиеся водостойкие продукты реакции, заполняют капилляры и поры закрепленного грунта, увеличивая плотность, прочность и морозостойкость.

Проведенные нами микроскопические исследования подтверждают вышеизложенное и показывают, что затвердевший образец закрепленного суглинистого грунта представляет собой сложный конгломерат кристаллических и коллоидных (или микрокристаллических) новообразований гидратов, а также остатков шлаковых, известковых зёрен, которые не прореагировали еще с водой, тонкораспределенной воды и воздуха.

Добавление добавки системы «Релаксол» в грунтоминеральную смесь обеспечивает значительное влияние на структурообразование за счет модифицирования продуктов гидратации. Пористость в присутствии добавки характеризуется меньшими размерами и объемом пор в сравнении с контрольными образцами грунта. В целом, формируется более совершенная мелкокристаллическая структура, в которой отмечается большее количество микроконтактов между кристаллогидратами. Общий эффект увеличения количества контактов и их уплотнение приводит к увеличению показателей прочности, что и было доказано авторами в работах [1-5].

Список использованной литературы

1. Грано Н.В. Композиція для укріплення зв'язних ґрунтів / Н.В. Грано, В.П. Кожушко // Проектування, будівництво і експлуатація нежорстких дорожніх одягів : мат. міжнародній науково-техніч. конф., яка присвячена 80-річчю ХНАДУ та дорожньо-будівельного факультету, м. Харків, 2010 р. – Х. : ХНАДУ, 2010. – С. 95-97.

2. Грано Н.В. Поліпшення будівельних властивостей ґрунтових основ дорожніх покриттів хімічною домішкою системи «Релаксол» / Н.В. Грано, В.П. Кожушко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва. – 2011. - №6 (92). – С. 132-135.

3. Грано Н.В. Забезпечення морозостійкості ґрунтів, укріплених вапном / Н. В. Грано // Матеріали всеукраїнської Інтернет - конференції молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (21-22 листопада 2012 року). – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – С. 123 - 127.

4. Пат. 58654 UA МПК E01C 3/00, E02D 3/00, E01C 21/00, E01C 23/00, E02D 27/10, E02D 5/34. Композиція для укріплення зв'язних ґрунтів / Кожушко В.П., Грано Н.В.; заявник та патентовласник Сумський нац. аграрний ун-т – №u201009294 ; заявл. 23.07.2010; опубл. 26.04.2011, Бюл. №8, 2011.

5. Пат. 17559 Україна, МПК E 01 C 3/00, E 02 D 3/12, C 09 K 17/40. Суміш для влаштування дорожнього покриття для автомобільних доріг та аеродромів / Смовський Ю.М., Кожушко В.П., Кожушко В.В.; заявник Сумський нац. аграрний ун-т. – № 20040605116 ; заявл. 29.06.2004 ; опубл. 16.10.2006, Бюл. №10.

6. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них : Монография в 3-х т. – Т. 1 : Коллоидная химия и физико-химическая механика цементных бетонов [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, Л.В. Трикоз и др. – К. : Наук. Думка, 2011. – 331 с.

7. Плугин А.Н. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них : Монография в 3-х т. – Т. 3 : Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них [Текст] / А.Н. Плугин, А.А. Плугин, О.А. Калинин и др. – К. : Наук. Думка, 2012. – 288 с.

8. Плугин А.Н. Электрогетерогенные взаимодействия при твердении цементных вяжущих: дисс... докт. хим. наук: 02.00.11. / Плугин Аркадий Николаевич – Харьков : ХИИТ, 1989.– 282 с.

9. Плугин А.Н. Развитие Коллоидной химии и Физико-химической механики дисперсных систем и материалов для строительных материалов и конструкций / А.Н. Плугин, А.А. Плугин // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків : УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 125. – С. 108-139.

10. Охотин В.В. Укрепление ґрунтовых дорожных оснований добавками извести / В.В. Охотин, Л.С. Лившиц, В.И. Васильев // Новости дорожной техники : сб. №3. – М. : Дориздат, 1941.– С.10 - 23

11. Бируля А.К. Структурообразование при комплексном укреплении ґрунтов / А.К. Бируля, Н.Ф. Сасько // Физико-химическая механика почв, ґрунтов, глин и строительных материалов. – Ташкент : ФАН, 1966. – С.131-137.

12. Будівельне матеріалознавство : підручник / за ред. П.В. Кривенка. – К. : ТОВ УВПК «ЕксОб», 2006. – 367 с.

13. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М. : Высш. школа, 1981. – 335 с.

Рецензент: д.т.н., професор Д.А. Плугин

Грано Наталья Владимировна, преподаватель специальных дисциплин в политехническом техникуме Конотопского института Сумского Государственного Университета, аспирант кафедры строительного производства Сумского Национального Аграрного Университета.

Тел.: (05447)2-51-71. E-mail: grano.natasha@mail.ru

Grano Natalia Vladimirovna, teacher of special disciplines of the Polytechnic School of Konotop Institute of Sumy State University, graduate student of department of building production of the Sumy National Agrarian University

Tel.: (05447)2-51-71. E-mail: grano.natasha@mail.ru

Статья поступила 24.04.2015

ДО ВОПРОСУ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО АЕРОДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВІД ВІТРОВОГО ЗБУДЖЕННЯ, ЩО ДІЄ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУ ПЛАТФОРМУ

Удовенко В.О., Альошечкіна Т.М.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ ВЕТРОВОГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ДЕЙСТВУЮЩЕГО НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПЛАТФОРМУ

Удовенко В.А., Алёшечкина Т.Н.

ON THE DETERMINATION OF UNSTEADY AERODYNAMIC LOAD WIND LOADS ACTING ON THE HORIZONTAL PLATFORM

V.A. Udovenko, T. N. Alyoshechkina

У статті розглянуті аеродинамічні явища, що найбільш часто зустрічаються. У зв'язку з цим ставиться завдання визначення нестационарного аеродинамічного навантаження, що діє на платформу при впливі вітрового збурення постійної інтенсивності. В результаті досліджень були уточнені аеродинамічні коефіцієнти, характер обтікання і частота зміни навантаження. Запропонований у статті чисельний метод дозволяє визначати як інтегральні значення аеродинамічного навантаження, так і розподіл її по поверхні об'єкта.

Ключові слова: аеродинаміка, турбулентність, математичні моделі.

В статье рассмотрены наиболее часто встречающиеся аэродинамические явления. В связи с этим ставится задача определения нестационарной аэродинамической нагрузки, действующей на платформу при воздействии ветрового возмущения постоянной интенсивности. В результате исследований были уточнены аэродинамические коэффициенты, характер обтекания и частота изменения нагрузки. Предложенный в статье численный метод позволяет определять как интегральные значения аэродинамической нагрузки, так и распределение ее по поверхности обтекаемого объекта.

Ключевые слова: аэродинамика, турбулентность, математические модели.

The article describes the most common aerodynamic phenomenon. In this regard, the task of determining the unsteady aerodynamic loads acting on the platform under the influence of wind disturbance of constant intensity. The studies were refined aerodynamic coefficients, the nature and frequency of the flow load. The proposed article numerical method allows to determine how the integral values of aerodynamic load and its distribution over the surface of the streamlined object.

Keywords: aerodynamics, turbulence, mathematical models

Введение

В связи с развитием современных численных методов аэрогидродинамики получила новый импульс развития и промышленная аэродинамика зданий и сооружений. Промышленная аэродинамика имеет дело с объектами, которые подвергаются воздействию воздушных

поток, включая порывы ветра, ураганы, воздействие турбулентности и т.д.

Основными источниками турбулентных течений в окрестности зданий и технических сооружений являются вихри. Причиной образования вихревых течений (пелен) является обтекание дозвуковым воздушным потоком острых кромок и изломов на поверхности тела, так как типичными

формами поперечных сечений промышленных зданий являются окружности (фабричные трубы, опоры рекламных щитов, газопроводы) и многоугольники (здания, различные опоры). В некоторых случаях, практический интерес представляет воздействие вихревых турбулентных следов одних технических объектов на другие (ансамбли застроек), определение характера распространения следов при выбросе в атмосферу вредных веществ в результате экологических катастроф и заданной розе ветров.

Важной проблемой промышленной аэродинамики является задача автоколебаний сооружений, ферм, трубопроводов и т.д. С точки зрения механики это явление можно рассматривать как автоколебания аэроупругих объектов. Энергия, поддерживающая колебания, черпается от набегающего воздушного потока. Характер поведения объекта определяется воздействием сил различной природы: аэродинамических, упругих, инерционных и демпфирующих. Причем, решающая роль принадлежит

аэродинамическим силам, которые во многом определяются структурой турбулентных течений за рассматриваемым объектом.

Современные математические модели, основанные на методе дискретных вихрей (МДВ) [1-5] позволяют моделировать сложные турбулентные течения, что можно рассматривать как новый этап в методологии численного эксперимента промышленной аэродинамики. Важной особенностью МДВ является то, что в процессе расчетов происходит отбор реальных (устойчивых) решений.

1. Постановка задачи

Рассматривается обтекание технического сооружения потоком идеального несжимаемого газа с скоростью V_∞ . Техническое сооружение состоит из горизонтальной платформы, установленной на вертикальных опорах (рис. 1). Задача состоит в определении нестационарной аэродинамической нагрузки, действующей на платформу при воздействии ветрового возмущения постоянной интенсивности.

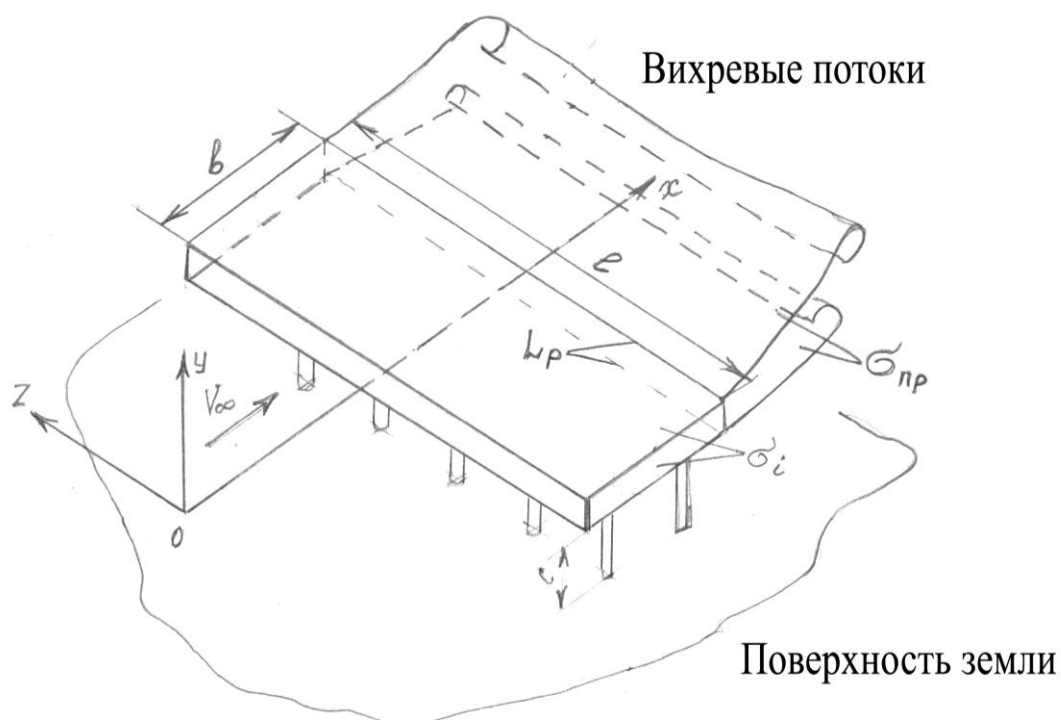


Рис. 1. Расчетная схема обтекания объекта воздушным потоком

Задача решается на основе метода дискретных вихрей [1-3]. В основе предлагаемой математической модели нелинейной аэродинамики лежат следующие положения.

Обтекаемая платформа моделируется набором m жёстких поверхностей σ_i ($i=1, \dots, m$) (рис. 1). Поверхности σ_i представляют собой плоские грани платформы. Обтекание опор платформы в данном расчетном случае не рассматривается, поскольку

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0, \operatorname{rot} \vec{v} = 0. \quad (1)$$

Данное уравнение позволяет ввести полный потенциал скорости $\Phi(\vec{r}, \tau)$ и потенциал возмущённой скорости $\varphi(\vec{r}, \tau)$,

$$\vec{v}(\vec{r}, \tau) = \nabla \Phi(\vec{r}, \tau) = \vec{V}_\infty + \nabla \varphi(\vec{r}, \tau), \quad (2)$$

где \vec{V}_∞ - скорость невозмущённого потока, ∇ - оператор градиента.

Для потенциала возмущенной скорости $\varphi(\vec{r}, \tau)$ в любой точке области D выполняется уравнение Лапласа:

$$\Delta \varphi = 0. \quad (3)$$

Таким образом, для нахождения скорости газа в любой точке $\vec{r} \in D$ следует найти потенциал скоростей $\varphi(\vec{r}, \tau)$, удовлетворяющий уравнению (1) и следующим граничным условиям:

1) на поверхностях σ_i , $i=1, \dots, m$ – условию непротекания, которое в связанной с σ_i системе координат заключается в равенстве нулю нормальных составляющих скорости газа

$$\frac{\partial \varphi(\vec{r}_\sigma, \tau)}{\partial n} = -\vec{V}_\infty \cdot \vec{n}(\vec{r}_\sigma, \tau) + \vec{w}^*(\vec{r}_\sigma, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_\sigma, \tau), \quad \vec{r}_\sigma \in \sigma_i, \quad (4)$$

2) на бесконечности – условию убывания возмущений:

$$\varphi(\vec{r}, \tau) \rightarrow 0, \quad |\nabla \varphi(\vec{r}, \tau)| \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad |\vec{r}| \rightarrow \infty; \quad (5)$$

3) след за обтекаемой платформой рассматривается как совокупность m_n вихревых пелен σ_{np} , ($p=1, \dots, m_n$), представляющих свободные поверхности

тангенциального разрыва скорости [1-2], на которых выполняются кинематическое условие совместности течения и условие отсутствия перепада давлений:

$$\begin{aligned} (\vec{v}(\vec{r}_{\sigma_n}, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{\sigma_n}, \tau))_- &= (\vec{v}(\vec{r}_{\sigma_n}, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{\sigma_n}, \tau))_+, \\ (p(\vec{r}_{\sigma_n}, \tau))_- &= (p(\vec{r}_{\sigma_n}, \tau))_+, \quad \vec{r}_{\sigma_n} \in \sigma_n = \bigcup_{p=1}^{m_n} \sigma_{np}, \end{aligned} \quad (6)$$

где индексы “-” и “+” означают предельные значения параметров при стремлении к точке $\vec{r}_{\sigma_n} \in \sigma_n$ с разных сторон от пелены;

геометрические размеры платформы существенно больше опор.

Среда плотностью ρ считается идеальной и несжимаемой, течение в области D (вне поверхностей σ_i платформы и следа за ними) является безвихревым [1] вне зоны вихревой пелены. Во всех точках области D (с радиус-векторами $\vec{r} \in D$) в каждый момент времени τ поле скоростей $\vec{v}(\vec{r}, \tau)$ удовлетворяет уравнениям неразрывности и отсутствия завихренности:

4) на линиях L_p схода вихревых пелен σ_{np} , $p=1, \dots, m_n$ с поверхностями σ_i (эти линии считаются заданными) выполняется гипотеза Чаплыгина – Жуковского – Кутта (Ч-Ж-К) о конечности скорости [5].

Давления в точках $\vec{r} \in D$ находятся с помощью интеграла Коши – Лагранжа:

$$C_p(\vec{r}, \tau) + (v(\vec{r}, \tau))^2 + 2 \frac{\partial \Phi(\vec{r}, \tau)}{\partial \tau} = f(\tau), \quad (7)$$

где $f(\tau)$ – некоторая функция, определяемая из условия на бесконечности.

Зная величину давления в каждой точке поверхности σ_i , можно найти суммарные силы, действующие на тело со стороны газа:

$$\vec{R} = - \int_{\sigma_i} C_p(\vec{r}_\sigma, \tau) \vec{n}(\vec{r}_\sigma, \tau) d\sigma, \quad (8)$$

2. Численный метод решения задачи

В соответствии с этим методом

Для численного решения сформулированной задачи модифицированный метод вихрей [5], в котором замкнутые вихревые рамки [1].

поверхности σ_i, σ_{np} заменяются замкнутыми вихревыми рамками, каждая из которых моделирует отдельный, охватываемый ею элемент (ячейку) поверхностей σ_μ, σ_{np} (рис..2).

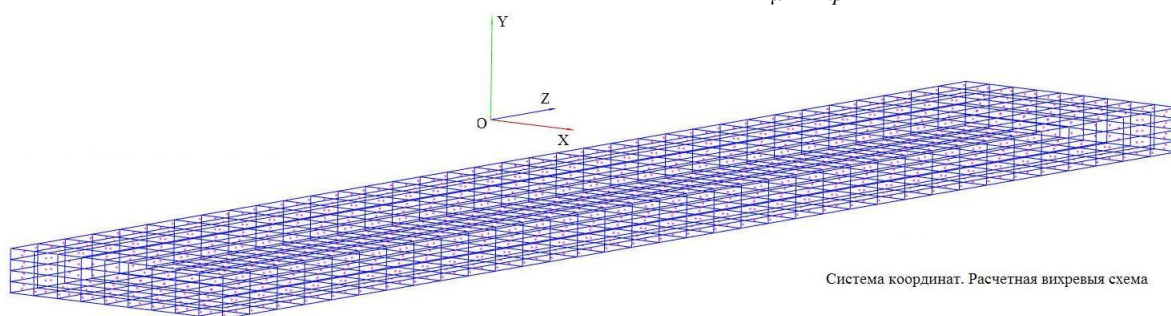


Рис.2. Расчетная вихревая схема горизонтальной платформы

Интенсивности G_{σ_j} , $j=1, \dots, N_\sigma$ и $G_{\sigma_{aj}}$, $j=1, \dots, N_{\sigma_n}$ этих рамок, где N_σ и N_{σ_n} - общее число ячеек на несущих поверхностях σ_i и на свободных поверхностях σ_{np} , определяем в ходе решения задачи. Возмущённый потенциал $\varphi(\vec{r}, \tau)$ и вектор относительной

скорости среды $\vec{v}(\vec{r}, \tau)$ в произвольной точке \vec{r} пространства определяем как суммы соответственно потенциалов и скоростей, индуцированных свободным потоком и всеми рамками, моделирующими обтекаемое тело:

$$\varphi(\vec{r}, \tau) \approx \frac{1}{4\pi} \left(\sum_{j=1}^{N_\sigma} \Theta_{\sigma_j}(\vec{r}, \tau) G_{\sigma_j}(\tau) + \sum_{j=1}^{N_{\sigma_n}} \Theta_{\sigma_{nj}}(\vec{r}, \tau) G_{\sigma_{nj}} \right), \quad (9)$$

$$\vec{v}(\vec{r}, \tau) \approx \vec{V}_\infty + \frac{1}{4\pi} \left(\sum_{j=1}^{N_\sigma} \vec{w}_{\sigma_j}(\vec{r}, \tau) G_{\sigma_j}(\tau) + \sum_{j=1}^{N_{\sigma_n}} \vec{w}_{\sigma_{nj}}(\vec{r}, \tau) G_{\sigma_{nj}} \right). \quad (10)$$

Здесь безразмерные скорости от вихревых рамок $\vec{w}_{\sigma(\sigma_n)_j}(\vec{r}, \tau)$ вычисляем в соответствии с законом Био-Савара [5]:

$$\vec{w}_{\sigma(\sigma_n)_j}(\vec{r}, \tau) = \oint_{l(l_n)_j} \frac{d\vec{l} \times (\vec{r} - \vec{r}_l)}{|\vec{r} - \vec{r}_l|^3}, \quad (11)$$

Потенциал $\varphi(\vec{r}, \tau)$, определяемый по формуле (9), удовлетворяет уравнению Лапласа (3), а скорость $\vec{v}(\vec{r}, \tau)$, найденная в соответствии с (10), - уравнениям (1). Потенциал (9) убывает на бесконечности,

убывает и его градиент, тем самым выполняя условие (5).

Граничное условие непротекания (4) записывается для контрольных точек, расположенных на жестких поверхностях платформы, $\vec{r}_{0k} \in S_k$ ($k=1, \dots, N_\sigma$) в виде:

$$\sum_{j=1}^{N_\sigma} \vec{w}_{\sigma_j}(\vec{r}_{0k}, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}, \tau) G_{\sigma_j} = - \sum_{j=1}^{N_{\sigma_n}} \vec{w}_{\sigma_n j}(\vec{r}_{0k}, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}, \tau) G_{\sigma_n j} + 4\pi(-\vec{V}_\infty + \vec{w}^*(\vec{r}_{0k}, \tau)) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}, \tau), \quad k=1, \dots, N_\sigma. \quad (12)$$

Контрольные точки берутся в центре соответствующих ячеек. Их радиус-векторы могут быть вычислены как среднее арифметическое радиус-векторов вершин ячеек.

Равенство (12) рассматривается как система линейных алгебраических уравнений для определения неизвестных циркуляций G_{σ_j} , $j=1, \dots, N_\sigma$ вихревых ячеек.

Правые части в выражении (12) определяются невозмущённым потоком, движением поверхностей σ_i и влиянием вихревой пелены, которая строится в зависимости от типа решаемой задачи. Метод дискретных вихрей позволяет решать, как стационарные, так и нестационарные задачи.

Нестационарная задача решается по временным шагам. Условие (7) перемещения частиц пелены со скоростью, равной местной скорости газа, рассматривается как дифференциальное уравнение, которое выполняется для концов каждого отрезка вихревой пелены. Положение концов отрезков определяется на каждом расчетном

шаге τ^r путём численного интегрирования этого уравнения. Условие же сохранения интенсивности дипольного слоя для частицы пелены приводит в дискретной модели к условию сохранения циркуляций вихревых рамок пелены. Условие Чаплыгина-Жуковского-Кутта о конечности скорости выполняется на линиях L_p , $p=1, \dots, m_p$, схода вихревых пелен (рис.1).

Таким образом, правые части системы линейных алгебраических уравнений (12) являются на каждом шаге по времени известными величинами, так что решение задачи обтекания заданных поверхностей сводится к нахождению неизвестных циркуляций вихревых рамок G_{σ_j} , $j=1, \dots, N_\sigma$, моделирующих обтекаемое тело.

В случае, когда обтекаемая поверхность является тонкой (например, плоская пластина) и моделируется бесконечно тонкой вихревой поверхностью, матрица

$$A_\sigma = (a_{kj})_{k,j=1}^{N_\sigma} = (\vec{w}_{\sigma_j}(\vec{r}_{0k}, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}, \tau))_{k,j=1}^{N_\sigma} \quad (13)$$

системы (12) является невырожденной [5], так что данная система имеет единственное решение $\{G_{\sigma_j}\}_{j=1}^{N_\sigma}$ при любых значениях правых частей. Это решение находится методом Гаусса.

При наличии замкнутых поверхностей σ_i , как показано в [3], матрица коэффициентов влияния A_σ (13) вырождена, и система (12) является несовместной. Для получения решения

задачи обтекания используются методы регуляризации, предложенные в работах [2,3].

3. Особенности обтекания тел с учетом их телесности и влияния поверхности экрана

В настоящей работе используется способ регуляризации системы (12), изложенный в [3]. Во-первых, для выделения единственного решения задачи обтекания задаётся условие

$$\sum_{\substack{j=1 \\ S_j \subset \sigma_i}}^{N_\sigma} G_{\sigma_j} = 0. \quad (14)$$

Во-вторых, для обеспечения более близкого совпадения поля скоростей внутри тела относительно его поверхности с нулевым, соответствующим точному решению задачи внутри тела могут задаваться N^d дополнительных

контрольных точек $\vec{r}_{0k}^d, k=1, \dots, N^d$, в которых требуется равенство суммарной скорости величине $\vec{w}^*(\vec{r}_{0k}^d, \tau)$:

$$\sum_{j=1}^{N_\sigma} \vec{a}_{kj}^\sigma G_{\sigma_j} \equiv \sum_{j=1}^{N_\sigma} \vec{w}_{\sigma_j}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) G_{\sigma_j} = - \sum_{j=1}^{N_\sigma} \vec{w}_{\sigma_{nj}}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) G_{\sigma_{nj}} + 4\pi(-\vec{V}_\infty + \vec{w}^*(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau)). \quad (15)$$

В решаемой задаче имеем одно тело, ограниченное замкнутой поверхностью σ_1 , моделируемой N^m рамками, и $m-1$ тонких поверхностей $\sigma_2, \dots, \sigma_m$, на которых

размещается N^h ячеек. Тогда добавление условий (15) и (14) к системе (12) приводит к переопределённой системе уравнений

$$\begin{cases} A^{tm} G^{tm} + A^{hm} G^h = B^{tm}, \\ A^{tmh} G^{tm} + A^{hh} G^h = B^h, \end{cases} \quad (16)$$

где

$$A^{tm} = \begin{pmatrix} \{a_{kj}\}_{k,j=1}^{N^m}, N^m \times N^m \\ \{a_{kix}^{jB}\}_{k=1}^{N^m} \Big|_{j=1}^{N^m}, N^m \times N^m \\ \{a_{kix}^{jB}\}_{k=1}^{N^m} \Big|_{j=1}^{N^m}, N^m \times N^m \\ \{a_{kix}^{jB}\}_{k=1}^{N^m} \Big|_{j=1}^{N^m}, N^m \times N^m \\ \{1\}_{j=1}^{N^m}, 1 \times N^m \end{pmatrix}, \quad A^{hm} = \begin{pmatrix} \{a_{kj}\}_{k=1}^{N^h} \Big|_{j=N^m+1}^{N^m+N^h}, N^h \times N^h \\ \{a_{kix}^{jB}\}_{k=1}^{N^h} \Big|_{j=N^m+1}^{N^m+N^h}, N^h \times N^h \\ \{a_{kix}^{jB}\}_{k=1}^{N^h} \Big|_{j=N^m+1}^{N^m+N^h}, N^h \times N^h \\ \{a_{kix}^{jB}\}_{k=1}^{N^h} \Big|_{j=N^m+1}^{N^m+N^h}, N^h \times N^h \\ \{1\}_{j=1}^{N^h}, 1 \times N^h \end{pmatrix},$$

$$A^{tmh} = \{a_{kj}\}_{k=N^m+1}^{N^m+N^h} \Big|_{j=1}^{N^m}, N^h \times N^m, \quad A^{hh} = \{a_{kj}\}_{k=N^m+1}^{N^m+N^h} \Big|_{j=N^m+1}^{N^m+N^h}, N^h \times N^m,$$

$$B^\phi = \begin{pmatrix} \left\{ - \sum_{j=1}^{N_\sigma} \vec{w}_{\sigma_{nj}}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) G_{\sigma_{nj}} + 4\pi(-\vec{V}_\infty + \vec{w}^*(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau)) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) \right\}_{k=1}^{N^\phi} \\ \left\{ - \sum_{j=1}^{N_\sigma} w_{\sigma_{njx}}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) G_{\sigma_{nj}} + 4\pi(-V_{\infty x} + w_x^*(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau)) \right\}_{k=1}^{N^\phi} \\ \left\{ - \sum_{j=1}^{N_\sigma} w_{\sigma_{nxy}}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) G_{\sigma_{nj}} + 4\pi(-V_{\infty y} + w_y^*(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau)) \right\}_{k=1}^{N^\phi} \\ \left\{ - \sum_{j=1}^{N_\sigma} w_{\sigma_{nzy}}(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau) G_{\sigma_{nj}} + 4\pi(-V_{\infty z} + w_z^*(\vec{r}_{0k}^\sigma, \tau)) \right\}_{k=1}^{N^\phi} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$B^k = \left\{ - \sum_{j=1}^{N_{\sigma_n}} \vec{w}_{\sigma_n j}(\vec{r}_{0k}, \tau) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}, \tau) G_{\sigma_n j} + 4\pi(-\vec{V}_{\infty} + \vec{w}^*(\vec{r}_{0k}, \tau)) \cdot \vec{n}(\vec{r}_{0k}, \tau) \right\}_{k=N^{\phi}+1}^{N^{\phi}+N^k}.$$

Решение этой системы находят, применяя к первому матричному уравнению метод наименьших квадратов [3]. Для этого левая и правая части этого уравнения

умножаются на транспонированную к A^{TM} матрицу $A^{TM\Box}$, что приводит к системе

$$\begin{cases} AG^{TM} + A^{TM\Box} A^{hTM} G^h = A^{TM\Box} B^{TM}, \\ A^{TMh} G^{TM} + A^{hh} G^h = B^h, \end{cases} \quad (18)$$

где $A = A^{TM\Box} A^{TM}$.

Матрица этой системы получается квадратной формата $(N^{TM} + N^h) \times (N^{TM} + N^h)$. Решая систему (18), находим циркуляции G_{σ_j} . Достаточно просто этот алгоритм обобщается и на случай, когда имеются одновременно несколько замкнутых тел.

При решении задач с учетом влияния поверхности экрана (поверхности Земли) необходимо учитывать, что на ней должно выполняться условие непротекания газа. Это условие можно обеспечить путем введения, в расчетную схему зеркально отображенных, относительно граничной поверхности, вихревых рамок противоположной циркуляции. Метод зеркального отображения подробно рассмотрен в работе [5].

4. Результаты расчетов

При решении данной задачи горизонтальная платформа рассматривалась как объемный параллелепипед заданных размеров, который моделировался 982-мя вихревыми ячейками, расположенными на гранях параллелепипеда. Сход свободных вихревых поверхностей (вихревой пелены) задавался на линиях L_p (см. рис.1 и 2).

На рис. 3 представлена вихревая структура обтекания платформы воздушным потоком постоянной интенсивности $V_{\infty} = \text{const}$. Из данного рисунка следует, что на поверхности экрана выполняется условие непротекания и вихревая пелена за обтекаемым телом распространяется над поверхностью земли.

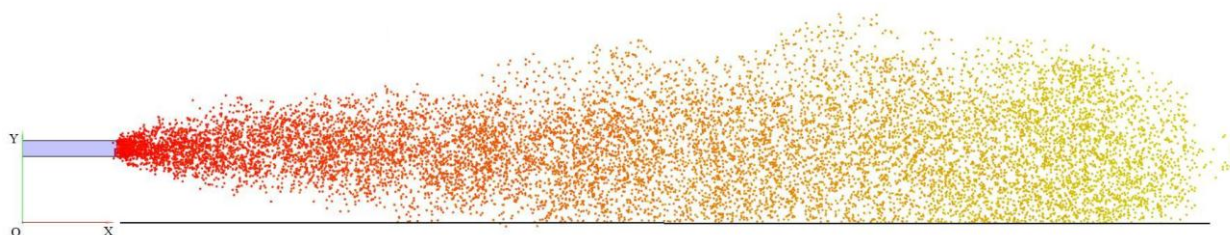


Рис. 3. Вихревая пелена за обтекаемым телом с учетом влияния близости земли

Более детальную информацию о структуре вихревого течения за платформой дают векторные поля скоростей в окрестности изучаемого объекта. На рис. 4 показаны векторные поля скоростей для двух сечений- в срединной плоскости платформы и продольной плоскости. Из представленных

полей скоростей следует, что обтекание рассмотренного тела является нестационарным. В свободном вихревом следе за обтекаемым телом образуются завихренности различной интенсивности, характерные для вихревой дорожки Кармана.

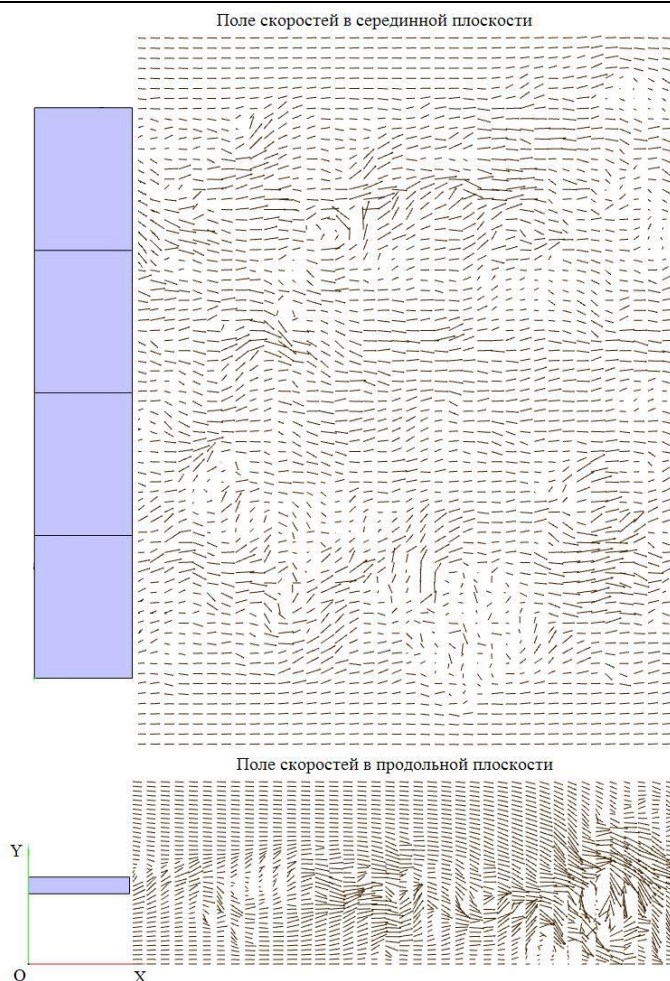


Рис. 4. Поле скоростей за обтекаемым объектом в двух плоскостях

Интегральные аэродинамические нагрузки, действующие на обтекаемое тело, определяемые в процессе решения задачи с помощью (8), представим в виде:

$$R_y = Y = C_y q S, \quad R_x = X = C_x q S, \quad (19)$$

где Y - нормальная сила, действующая перпендикулярно горизонтальной поверхности платформы (вдоль оси Oy принятой системы координат);

X - тангенциальная сила, действующая вдоль оси Ox системы координат $Oxyz$ (рис. 1);

$q = \rho V_\infty^2 / 2$ - скоростной напор набегающего потока;

$S = l \cdot b$ - характерная площадь (в рассматриваемом случае принимаем $S = l \cdot b = 302.4 \text{ м}^2$).

Безразмерные аэродинамические коэффициенты C_y и C_x , определяющие интегральные значения нагрузки на платформу в процессе развития обтекания платформы воздушным потоком, показаны на рис. 5.

Характер развития обтекания можно разделить на две области. Первая область соответствует безразмерному времени $\tau = V_\infty t / b = 0 \dots 8$, в течение которого

формируется структура течения. Вторая область соответствует устойчивому сформировавшемуся нестационарному течению при $\tau \geq 8$. Эта область характеризуется устойчивым постоянным периодическим изменением аэродинамических коэффициентов во времени.

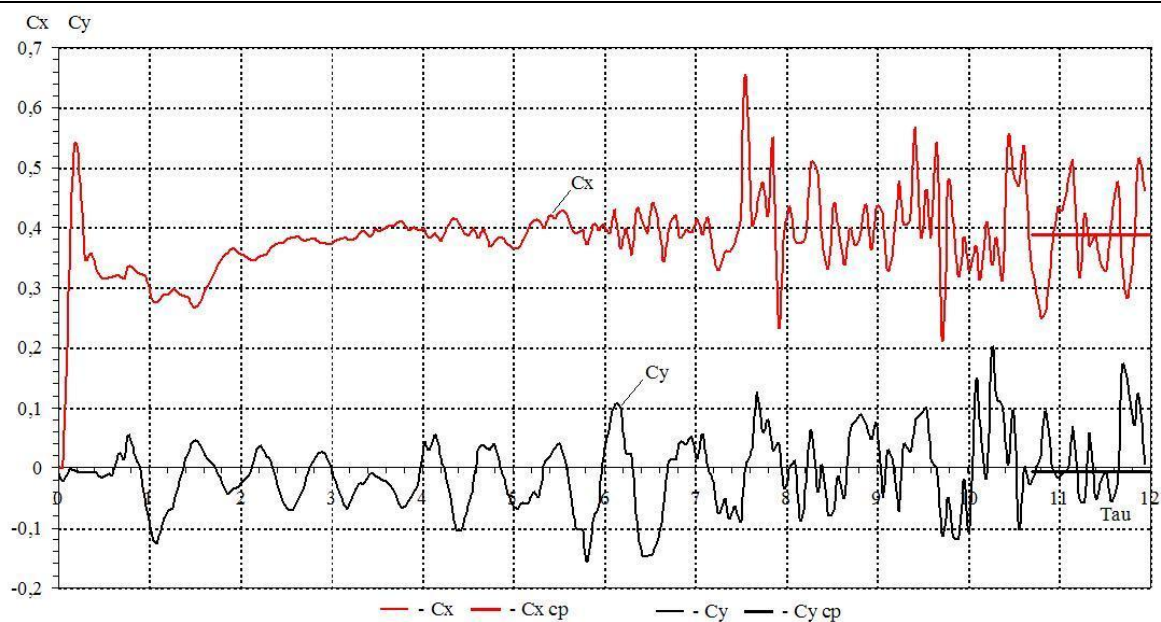


Рис. 5. Изменение безразмерных аэродинамических коэффициентов суммарной аэродинамической нагрузки

Из представленных графиков следует, что при $\tau \geq 10$ изменение аэродинамических коэффициентов происходит относительно некоторых средних значений (сплошные горизонтальные линии на рис.5). Для количественной оценки степени нестационарности процесса обтекания платформы можно определить среднеквадратичные отклонения аэродинамических коэффициентов C_Y и C_X , частоту изменения нагрузки и т.д.

Предложенный численный метод позволяет определять как интегральные

значения аэродинамической нагрузки, так и распределение ее по поверхности обтекаемого объекта. В качестве иллюстрации на рис. 6 показано распределение коэффициента давления p по поверхности платформы в заданный расчетный момент времени ($\tau = 12$). По картине распределения давления можно определить характер нагружения различных поверхностей платформы от воздействия вихревых нагрузок.

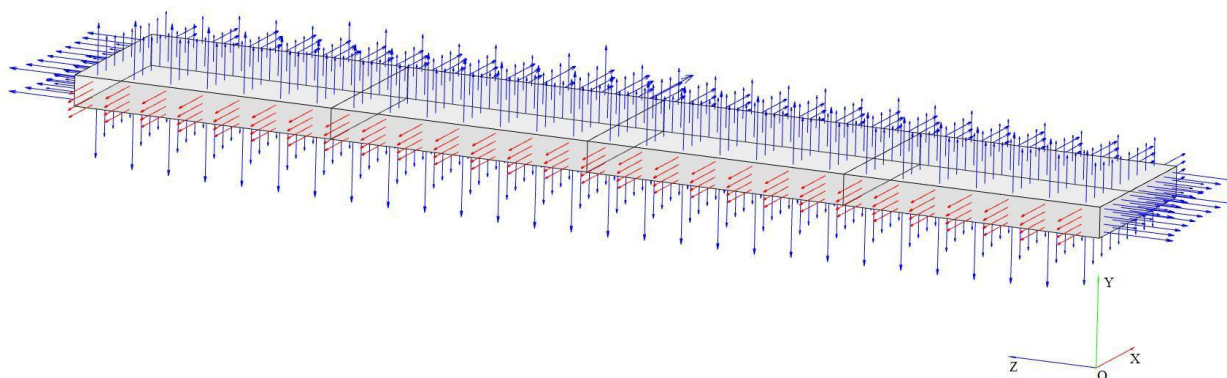


Рис. 5. Распределение поля давлений по поверхности платформы

Список использованных источников

1. Апарин В. А. Метод дискретных вихрей с замкнутыми вихревыми рамками/ В. А. Апарин, А. В. Дворак// Труды ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986. - Вып. 1313. - с.424-429.

2. Лифанов И. К. Методы сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент/ И. К. Лифанов. - М.: ТОО "Янус", 1995 - 504 с.

3. Удовенко В. А К расчету обтекания замкнутых тел./ В. А Удовенко, А.В.,Дворак// Научно-методические материалы по аэродинамике летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1989. – Часть 2. - с.19-36.

4. Дворак А. В. Применение квадратичной аппроксимации к определению аэродинамической нагрузки на несущих поверхностях /А. В. Дворак, В.А. Удовенко// Научно-методические материалы по аэродинамике летательных аппаратов. – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1987. - С. 117-125.

5. Белоцерковский С.М. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью/С.М. Белоцерковский, М.И. Ништ. М.:Наука, 1978. – 352 с.

Рецензент: д.т.н., профессор В.Б Гринёв

Удовенко Владимир Алексеевич, E-mail: uva333@mail.ru

Алёшечкина Татьяна Николаевна, старший преподаватель кафедры строительной механики ХНУСА. , Тел.: (057) 706-20-63. , E-mail: alyoshechkina_t@mail.ru

Udovenko Vladimir Alekseevich, E-mail: uva333@mail.ru

Alyoshechkina Tatyana Nikolaevna, senior lecturer department of structural mechanics KhNUBA, tel.: (057) 706-20-63. , E-mail: alyoshechkina_t@mail.ru

Статья поступила 29.04.2015

УДК 624.073.11:539.371

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ИЗОТРОПНЫХ ПЛИТ С СИММЕТРИЧНОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМ ЗАГРУЖЕНИИ

к.т.н., доцент Орел Е.Ф., к.т.н., доцент Ватуля Г.Л., Игнатенко А.В.

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ІЗОТРОПНИХ ПЛИТ З СИМЕТРИЧНОЮ ПОПЕРЕЧНОЮ НЕОДНОРІДНІСТЮ ПРИ ТЕРМОСИЛОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ

к.т.н., доцент Орел Є.Ф., к.т.н., доцент Ватуля Г.Л., Ігнатенко А.В.

STRESS-STRAIN STATE OF ISOTROPIC PLATES WITH SYMMETRIC TRANSVERSE DISSIMILARITY UNDER THE THERMAL FORCE LOADING

PhD, Associated Professor Orel E.F., PhD, Associated Professor Vatulia G.L., Ignatenko A.V.

В статье приведена методика расчета изгибаемых в двух направлениях сталебетонных плит с различными условиями опирания при силовых и температурных воздействиях с учетом нелинейности деформирования и трещинообразования бетона в условиях плоского напряженного состояния, пластических деформаций стального листа за пределом упругости, податливости объединения листа с бетоном. Получена полная система уравнений, описывающая напряженно-деформированное состояние сталебетонной плиты под действием поперечной нагрузки.

Ключевые слова: *сталебетонная балка, огнестойкость конструкции, предел огнестойкости, стандартный температурный режим пожара, предельное состояние, термосиловое воздействие.*

У статті наведено методику розрахунку згинальних за двома напрямками сталобетонних плит з різними умовами опирання при силових та температурних впливах, з урахуванням нелінійності деформування і тріщиноутворення бетону в умовах плоского напруженого стану, пластичних деформацій сталевих листів за межею пружності, податливості об'єднання листа з бетоном. Отримано повну систему рівнянь, що описує напружено-деформований стан сталобетонної плити під дією навантаження.

Ключові слова: сталобетонна балка, вогнестійкість конструкції, границя вогнестійкості, стандартний температурний режим пожеги, граничний стан, термосилові впливи.

The authors proposed the calculation methodology of steel concrete plates, bended in two directions. The discussed approach is grounded on different supporting conditions of the plates with symmetric transverse dissimilarity at the power and temperature influence, taking into account nonlinear concrete deformation in the conditions of plane stress, plastic deformations of steel sheet after yield limit, concrete and steel sheet joint compliance. It's assumed standard temperature range of fire in the room and instantaneous load. Cause and fire scenario are not considered. During the methodology argumentation the concrete nonstationary temperature-humidity conditions with flexible evaporation boundary were taken into account together with temperature variability of materials physical-mechanical properties. The obtained results were verified using finite element simulation. The three-dimensional models for fire resistance definition of examined plates were proposed using ANSYS software package. All investigations were done in order to provide the demanded range of fire resistance rating.

Keywords: Steel-concrete beam, structure fire resistance, fire-resistance rating, fire standard temperature conditions, limiting state, thermal force loading.

Введение. Вопросам развития теории и методов расчета сталобетонных и сталежелезобетонных конструкций уделяется все больше внимания, вследствие использования таких конструкции при проектировании новых и реконструкции существующих зданий и сооружений. Наибольший эффект от внешнего армирования достигается в изгибаемых в двух направлениях плитах перекрытий и покрытий зданий и сооружений. Внешняя арматура в виде листов или прокатных профилей позволяет эффективно выполнять сталобетонные плиты с большим процентом армирования при ограниченных размерах сечений и при двойном армировании заменять ими стальные конструкции с экономией стали до 45 %.

Обзор последних публикаций и исследований. Наряду с оценкой несущей способности сталобетонных конструкций при различных условиях силового нагружения [1-5], немаловажным фактором, способствующим дальнейшему внедрению

таких конструкций в практику проектирования и строительства, является разработка методики их расчета на температурные воздействия при нестационарном температурно-влажностном поле с податливой границей парообразования, а также учета переменности физико-механических характеристик материалов при нагревании. Рассматриваемые в статье вопросы являются продолжением исследований [6-8].

Целью исследований является усовершенствование методики оценки напряженно-деформированного состояния сталобетонных плит с симметричной и несимметричной поперечной неоднородностью на термосиловое воздействие с учетом различных условий их опирания.

Основной материал исследований. Рассмотрим плиту из изотропного материала, упругие и термические свойства которого изменяются по толщине по закону:

$$\begin{cases} E = E(z); \\ \nu = \nu(z); \\ \alpha_T = \alpha_T(z). \end{cases} \quad (1)$$

Предположим, что все эти функции являются симметричными относительно срединной плоскости плиты. В связи с неоднородностью материала здесь имеем дело с изменяющимся по толщине коэффициентом теплопроводности $\lambda(z)$, вследствие чего температурное поле не будет линейно зависеть от z . Предполагая, что перенос тепла происходит только поперек плиты, запишем уравнение теплопереноса в неоднородном теле [7, 8] в виде

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = 0, \quad (2)$$

где

$$T(x, y, z) = T_0(x, y) + \Delta T(x, y) \cdot f(z), \quad (3)$$

$$f(z) = \left(\int_0^z \frac{dz}{\lambda(z)} \right) / \left(\int_{-h/2}^{h/2} \frac{dz}{\lambda(z)} \right) \quad (4)$$

Опираясь на гипотезу Кирхгофа о прямых нормальных, можно определить деформации, а затем в соответствии с обобщенным законом Гука – напряжения:

$$\bar{\sigma} = E(\bar{\varepsilon}^0 + z\bar{\chi}) - \frac{E\alpha_T}{1-\nu}(T_0 + \Delta Tf). \quad (5)$$

Частным случаем поперечно-неоднородной плиты является плита (рис.1), состоящая из нескольких (чаще всего трех) слоев и называемая плитой «сэндвич» [9, 10].

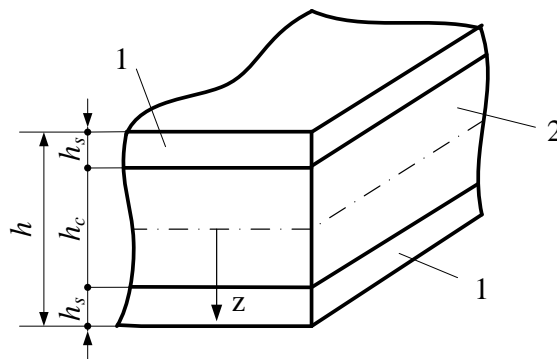


Рис. 3.1. Поперечное сечение плиты: 1 – стальной лист, 2 – бетон

Предположим, что температура на нижней и верхней поверхности плиты отличается на величину ΔT . Сначала необходимо определить функцию $f(z)$. В знаменателе выражения (3.6) фигурирует интеграл

$$\int_{-h/2}^{h/2} \frac{dz}{\lambda(z)} = \frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h - h_s}{\lambda_s}. \quad (6)$$

Числитель дроби (4) выражается двояко в зависимости от координаты

$$\int_0^z \frac{dz}{\lambda(z)} = \begin{cases} \frac{z}{\lambda_c} & \text{при } 0 \leq z \leq \frac{h_c}{2} \\ \frac{h_c}{2\lambda_c} + \frac{2z-h_c}{2\lambda_s} & \text{при } \frac{h_c}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}. \end{cases} \quad (7)$$

Определим коэффициенты, характеризующие трехслойную плиту.

$$S = \frac{E_s h}{1-\nu_s^2} = \frac{h/2}{-h/2} \frac{E(z)}{1-\nu_s^2(z)} dz = 2 \left[\int_0^{h_c/2} \frac{E_c(z)}{1-\nu_c^2(z)} dz + \int_{-h_c/2}^{h/2} \frac{E_s(z)}{1-\nu_s^2(z)} dz \right] = \frac{E_c h_c}{1-\nu_c^2} + \frac{E_s (h-h_c)}{1-\nu_s^2};$$

$$\nu_s = \frac{2 \left[\int_0^{h_c/2} \frac{E_c \nu_c}{1-\nu_c^2} dz + \int_{h_c/2}^{h/2} \frac{E_s \nu_s}{1-\nu_s^2} dz \right]}{S} = \frac{\frac{E_c h_c}{1-\nu_c^2} \nu_c + \frac{E_s (h-h_c)}{1-\nu_s^2} \nu_s}{\frac{E_c h_c}{1-\nu_c^2} + \frac{E_s (h-h_c)}{1-\nu_s^2}};$$

$$\alpha_T = \frac{2}{S(1-\nu_s)} \left[\int_0^{h_c/2} \frac{E_c \alpha_{Tc}}{1-\nu_c} dz + \int_{h_c/2}^{h/2} \frac{E_s \alpha_{Ts}}{1-\nu_s} dz \right] = \frac{\frac{E_c h_c}{1-\nu_c} \alpha_{Tc} + \frac{E_s (h-h_c)}{1-\nu_s} \alpha_{Ts}}{(1+\nu_s) \left[\frac{E_c h_c}{1-\nu_c^2} + \frac{E_s (h-h_c)}{1-\nu_s^2} \right]};$$

$$D = 2 \left[\int_0^{h_c/2} \frac{E_c z^2}{1-\nu_c^2} dz + \int_{h_c/2}^{h/2} \frac{E_s z^2}{1-\nu_s^2} dz \right] = \frac{1}{12} \left[\frac{E_c h_c^3}{1-\nu_c^2} + \frac{E_s (h^3 - h_c^3)}{1-\nu_s^2} \right];$$

$$\nu_D = \frac{2 \left[\int_0^{h_c/2} \frac{E_c \nu_c z^2}{1-\nu_c^2} dz + \int_{h_c/2}^{h/2} \frac{E_s \nu_s z^2}{1-\nu_s^2} dz \right]}{D} = \frac{\frac{E_c h_c^3}{1-\nu_c^2} \nu_c + \frac{E_s (h^3 - h_c^3)}{1-\nu_s^2} \nu_s}{\frac{E_c h_c^3}{1-\nu_c^2} + \frac{E_s (h^3 - h_c^3)}{1-\nu_s^2}};$$

$$\alpha_{TD} = \frac{2h}{D(1-\nu_D)} \left[\int_0^{h_c/2} \frac{E_c \alpha_{Tc} \frac{z}{\lambda_c}}{(1-\nu_c) \left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h-h_c}{\lambda_s} \right)} dz + \int_{h_c/2}^{h/2} \frac{E_s \alpha_{Ts} \left(\frac{h_c}{2\lambda_c} + \frac{2z-h_c}{2\lambda_s} \right) z}{(1-\nu_s) \left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h-h_c}{\lambda_s} \right)} dz \right] =$$

$$= h \frac{\frac{E_c h_c^3}{(1-\nu_c) \lambda_c} \alpha_{Tc} + \frac{E_s (h^2 - h_c^2)}{2(1-\nu_s)} \left(\frac{3h_c}{\lambda_c} + \frac{2h+h_c}{\lambda_s} \right) \alpha_{Ts}}{(1-\nu_D) \left[\frac{E_c h_c^3}{1-\nu_c^2} + \frac{E_s (h-h_c^3)}{1-\nu_s^2} \right] \left(\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h-h_c}{\lambda_s} \right)}.$$

После определения постоянных, дальнейший ход решения статических задач для трехслойной плиты аналогичен решению для однородной изотропной плиты. Для упрощения

предположим, что на плиту действуют только вертикальные нагрузки и постоянная разность температур, т.е.

$$\vec{X} = \vec{p} = \vec{m} = \vec{0}, \quad \vec{N} = \vec{0}, \quad T^0 = 0, \quad \Delta T = const. \quad (8)$$

Принимая во внимание соотношение между кривизнами $\vec{\chi}$ и прогибами плиты w , приведем выражение (3.8) к виду

$$\vec{\sigma} = -\frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} z \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + (1+\nu)\alpha_T \Delta T f \\ z \left(\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + (1+\nu)\alpha_T \Delta T f \\ z(1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Исходя из уравнения равновесия $d_I^T \vec{\sigma} + \frac{\partial \vec{\tau}}{\partial z} + \vec{X} = \vec{0}$ и учитывая предпосылки (8), запишем

$$\frac{\partial \vec{\tau}}{\partial z} = -d_I^T \vec{\sigma} = \frac{Ez}{1-\nu^2} d_2 \nabla^2 w, \quad (10)$$

Производные напряжений $\vec{\tau}$ выразим непосредственно через поперечные силы \vec{Q} :

$$\frac{\partial \vec{\tau}}{\partial z} = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \frac{\vec{Q}}{D}. \quad (11)$$

После интегрирования обеих частей равенства, принимая во внимание зависимость (3.13) и граничные условия на наружных поверхностях плиты, ($\tau^d = \tau^g = 0$) получим

$$\vec{\tau} = \frac{12}{h^3} \frac{1-\nu^2}{E_D} \vec{Q} \int_z^{h/2} \frac{Ez}{1-\nu^2} dz. \quad (12)$$

Входящий в последнее выражение интеграл выражается по-разному в зависимости от переменного предела интегрирования z . Так, при $\frac{h_c}{2} < |z| < \frac{h}{2}$:

$$\int_z^{h/2} \frac{Ez}{1-\nu^2} dz = \left[\frac{E_s}{1-\nu_s^2} \frac{z^2}{2} \right]_z^{h/2} = \frac{1}{8} \frac{E_s h^2}{1-\nu_s^2} (1-4\zeta^2),$$

при $|z| < \frac{h_c}{2}$:

$$\int_z^{h/2} \frac{Ez}{1-\nu^2} dz = \int_z^{h_c/2} \frac{E_c z}{1-\nu_c^2} dz + \int_{h_c/2}^{h/2} \frac{E_s z}{1-\nu_s^2} dz = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_c h^2}{1-\nu_s^2} (\zeta_c^2 - \zeta^2) + \frac{1}{8} \cdot \frac{E_s h^2}{1-\nu_s^2} (1-4\zeta_c^2),$$

Подставив вычисленные интегралы в выражение (12), получим в итоге распределение напряжений $\bar{\tau}$ по толщине плиты:

$$\bar{\tau} = \begin{cases} \frac{3}{2} \frac{\bar{Q}}{h} (1 - 4\zeta^2) e_s & \text{для } \frac{h_c}{2} < |z| < \frac{h}{2}, \\ \frac{3}{2} \frac{\bar{Q}}{h} \left[4e_c (\zeta_c^2 - \zeta^2) + e_s (1 - 4\zeta_c^2) \right] & \text{для } |z| < \frac{h_c}{2}, \end{cases} \quad (13)$$

где

$$e_s = \frac{E_s}{E_D} \frac{1 - \nu_D^2}{1 - \nu_s^2}, \quad e_c = \frac{E_c}{E_D} \frac{1 - \nu_D^2}{1 - \nu_c^2}. \quad (14)$$

Выводы. Таким образом, используя метод конечных разностей, получены разрешающие уравнения для оценки напряженно-деформированного состояния плит с симметричной поперечной неоднородностью при термосиловых воздействиях. Отметим, что для трехслойной плиты, средняя часть которой менее жесткая

чем наружные, напряжения $\bar{\tau}$ выравниваются в большей степени, чем в случае однородной плиты, для которой мы имели бы чисто параболическое очертание. В связи с этим наибольшее тангенциальное напряжение при $z = 0$ меньше, чем в однородной плите.

Список использованной литературы

1. Чихладзе Э.Д. Теория деформирования сталебетонных плит [Текст] / Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. // Совершенствование методов расчета и проектирования конструкций и сооружений // Сборник научных трудов - Харьков, ХарГАЖТ. - 1996. - Вып. 27 - С. 4-39.
2. Chikhladze E.D. Experimental Researches of Steel-Concrete Plates [Текст] / Chikhladze E.D., Vatulya G.L. // Shells and spatial structures: from resent past to the next millennium // Proceedings of the IASS 40th Anniversary Congress - Madrid, - 1999 - vol.1. - С. 13-18.
3. Орел Е.Ф. Моделирование напряженно-деформированного состояния трехслойных сталебетонных плит [Текст] / Орел Е.Ф. // Сборник научных трудов - Луганск, ЛНАУ. - 2007. - Вып. 71(94) - С. 22-26.
4. Ong K.C.G. Flexural Test of Steel-Concrete Open Sandwiches [Текст] / Ong K.C.G., Mays G.C., Cusens A.R. // Magazine of Concrete Research. - 1982. - vol. 34. - No.120, pp.130-138.
5. Клименко Ф.Е. Сталебетонные конструкции с внешним полосовым армированием / Ф.Е. Клименко. - Киев: Будівельник, 1984. - 88 с.
6. Э.Д. Чихладзе Огнестойкость бетонных и сталебетонных конструкций / Э.Д. Чихладзе, А.И. Жакин, М.А. Веревичева и др. - Х.: ХарГАЖТ, 2000. - 97с.
7. Основы расчета и проектирования комбинированных и сталебетонных конструкций / [Чихладзе Э.Д., Ватуля Г.Л., Китов Ю.П. и др.]; под ред Э.Д. Чихладзе - Киев: Транспорт Украины, 2006. - 104с.
8. Ватуля Г.Л. Влияние пожара на напряженно-деформированное состояние сталебетонных плит [Текст] / Ватуля Г.Л., Орел Е.Ф., Берестянская С.Ю. // Зб. наук. праць - Харків: УкрДАЗТ, 2013. - Вип. 135 - С.308-314.
9. Dundrova V. Teorie ohybu sendivicovych desek [Текст] / V. Dundrova, V. Kovarik, P. Slapak. - Praha: akademie ved, 1965. - 231 p.
10. Димитриенко Ю.И. Многомасштабное конечно-элементное моделирование трехслойных сотовых композитных конструкций [Текст] / Димитриенко Ю.И., Федонюк Н.Н., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Прозоровский А.А // Наука и образование. Эл №ФС77 - 4. 07, 2014. - С. 243-265.

Рецензент: д.т.н., професор Пługин А.А.

Орел Евгений Федорович, к.т.н., доцент, доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство», контактный тел. 057 -730-1067 (10-67)

Ватуля Глеб Леонидович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой строительной механики и гидравлики, контактный тел. 057 -730-1070 (10-70)

Игнатенко Андрей Васильевич, ассистент кафедры «Мосты, конструкции и строительная механика» Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, контактный тел. 057 -730-1070 (10-70)

Orel Yevhen Fedorovich, PhD, Associated Professor, Associated Professor of Track and Track Facilities Department, Tel. 057 -730-1067 (10-67)

Vatulia Glib Leonidovich, PhD, Associated Professor, Head of Building Mechanics and Hydraulics Department, Tel. 057 -730-1070 (10-70)

Ignatenko Andrii Vasilevich, Assistant of Lecturer of Bridge, Structures and Building Mechanics Department Kharkiv National Road University, Tel. 057 -730-1070 (10-70)

Статья поступила 20.05.2015

УДК 536.248.2

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ОБ'ЄМНИХ АМОРФНИХ СТРУКТУР

А.М. Павленко, Б.О. Усенко, А.В. Кошлак

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка (Полтава, Україна)

ЭНЕРГОСБЕРИГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ АМОРФНЫХ СТРУКТУР

А.Н. Павленко, Б.О. Усенко, А.В. Кошлак

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка (Полтава, Украина)

ENERGOSBERIGAYUSCHIE TECHNOLOGY OF FORMATION OF BULK AMORPHOUS STRUCTURE.

AN Pavlenko, BO Usenko AV Koshlakov.

Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk (Poltava, Ukraine).

В статті наведено результати експериментального дослідження енергозберігаючих технологій формування об'ємних аморфних сплавів. Розглянуті методи математичного моделювання та оптимізації процесу отримання об'ємних аморфних структур, які дозволяють скоротити час експериментальних досліджень та матеріальні ресурси для створення високоефективного виробництва аморфних сплавів. Результати фізичних експериментів порівнюються з результатами розрахунку. Отримані результати можуть бути використані для аналізу фізичних закономірностей та обґрунтованого вибору технологічних режимів формування аморфних структур

Ключові слова: енергозбереження, аморфна структура, теплопровідність, математична модель, охолодження.

В статье приведены результаты экспериментального исследования энергосберегающих технологий формирования объемных аморфных сплавов. Рассмотрены методы математического моделирования и оптимизации процесса получения объемных аморфных

структур, которые позволяют сократить время экспериментальных исследований и материальные ресурсы для создания высокоэффективного производства аморфных сплавов. Результаты физических экспериментов сравниваются с результатами расчёта. Полученные результаты могут быть использованы для анализа физических закономерностей и обоснованного выбора технологических режимов формирования аморфных структур.

Ключевые слова: энергосбережения, аморфная структура, теплопроводность, математическая модель, охлаждение.

In article results of experimental research energy-saving technologies of formation of volume amorphous alloys. The investigations of casting technology in cooled form is time-consuming, which allows to reduce the use of methods of mathematical modeling and optimization. The methods of mathematical modeling and optimization of the process obtaining volume amorphous structures, which can reduce experimental studies and material resources for create a highly efficient production of amorphous alloys. The use of modern methods of mathematical modeling allows us to solve complex problems of heat transfer, to investigate the features of the technological process, identify the qualitative picture of the interaction of various factors. There is a possibility by means of calculation to establish quantitative functional relationships.

The results provide an effective assessment of the intensity of heat transfer during the casting process, which makes it possible to estimate and predict the ability of alloys to the amorphization of the structure.

The results of physical experiments are compared with the results of the calculation. The results can be used to analyze the physical regularities and informed choice of technological modes of formation of amorphous structures.

Keywords: energy efficiency, amorphous structure, thermal conductivity, a mathematical model of cooling.

Вступ

Формування аморфної структури металів та сплавів призводить до фундаментальних змін магнітних, електричних, механічних, надпровідних та інших властивостей. Сплави з аморфною структурою мають високу твердість, міцність, в'язкість руйнування, корозійну стійкість, зносостійкість. Всі перераховані вище властивості роблять аморфні сплави ідеальними енергозберігаючими матеріалами для застосування в області теплоенергетичних технологій та теплоенергетичних установок.

Процес формування масивного шару з аморфною структурою має ряд проблем, так як охолодження об'ємного масиву розплавленого металу, на відміну від тонких плівок є процесом, який відрізняється значною інтенсивністю енергообмінних процесів. Для отримання масивних аморфних структур нами була розроблена експериментальна лабораторна установка, на якій досліджували процес отримання масивних аморфних структур методом

розливання в мідну охолоджуючу форму з наступним швидкісним охолодженням.

Теоретична частина

Для можливості отримання аморфної структури в чистих металах швидкість охолодження розплаву повинна бути не нижче 10^6 К/с, що досить складно забезпечити при даній технології.

В якості досліджуваних були обрані сплави з добавками, які збільшують схильність рідких сплавів до об'ємної аморфізації. Сплави $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$, $\text{Ni}_{62,4}\text{Nb}_{37,6}$, $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$, $\text{Co}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ які були виготовлені з порошкових компонентів. Для виготовлення сплавів використовувались чисті шихтові матеріали. Досліджувані сплави були виплавлені в індукційній високочастотній печі в атмосфері аргону методом прямого сплавлення компонентів. Після отримання однорідного розплаву через отвір в днищі тигля розплав виливається в охолоджувану мідну форму. Хімічний склад основних компонентів сплаву контролювався

мікрорентгеноспектральним аналізом з точністю до ± 1 ат % і локальністю $\sim 1,0$ мкм.

Процес отримання масивного шару металу з аморфною структурою виконували способом розливання в форму, що охолоджується водою в процесі активного тепловідведення тепло буде витрачатися на випаровування води, що знаходиться біля контактної поверхні, в такому випадку можна розглядати 3 режими охолодження [1].

У першому випадку швидкість руху води має малі значення і в процесі охолодження утворюється паровий шар, що огортає теплопровідну поверхню. У цьому випадку поверхня з боку води покривається паром, створюючи термоопір тепловому потоку.

У другому випадку при збільшенні швидкості руху охолоджуючої води парова фаза у теплообмінній поверхні буде схильна до руйнування, що призводить до підвищення інтенсивності тепловідведення.

У третьому випадку при турбулентному режимі течії масова витрата води має максимальне значення, і відсоток парової фази матиме мінімальне значення, вода буде виштовхувати пар і швидкість охолодження в цьому випадку буде мати максимальні значення.

Таким чином, змінюючи витрату води в установці, поступово збільшуючи швидкість руху охолоджуючої води у теплообмінній

стінці можна управляти щільністю теплового потоку на охолоджуваній зовнішній поверхні форми і, відповідно процесом затвердіння.

Затвердіння зливка відбувається в результаті відведення теплоти перегріву рідкого металу і прихованої теплоти затвердіння від зливка в охолоджувану форму і далі в навколишнє середовище [1].

Для вивчення структури і визначення ступеня аморфізації вирізали кілька зразків (темплетів) таким чином, щоб можна було визначити зміну структури по ряду поперечних перерізів. Для виявлення мікроструктури проводилося хімічне травлення з використанням реактиву, що складається з $\text{CH}_3\text{-COOH}$, HNO_3 і HF . Для визначення ступеня аморфізації проводили електронно-макроскопічні дослідження в режимі прямого розширення. Для візуального перегляду зразків і фотографування застосовували мікроскоп ММР-4 [1].

Металофізичними дослідженнями було встановлено, що досліджуваний шар металу, отриманий методом лиття в охолоджувану форму в першому випадку рис.1 має кристалічну ферито-перлітну структуру, утворення аморфної структури не відбулося, оскільки швидкість руху охолоджуючої води мала значення менше 1 м/с , при максимальній температурі води 15°C і максимальній товщині шару металу.

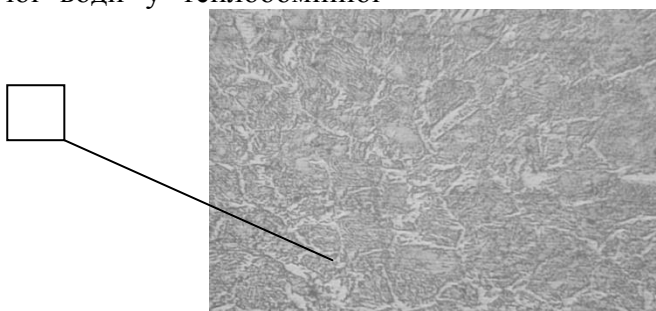
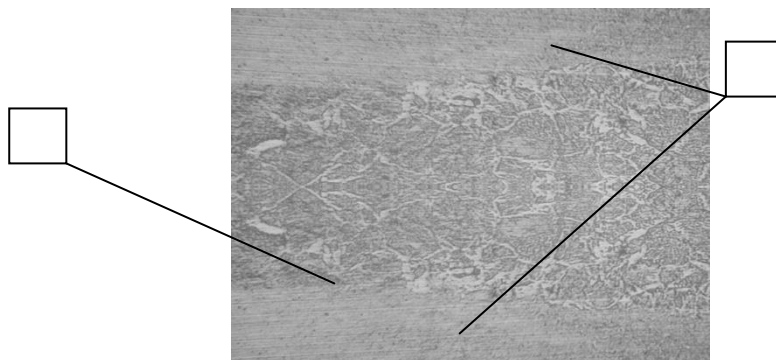


Рис.1 – Кристалічна структура масивного шару металу

Досліджуваний шар металу в другому випадку рис.2 частково має аморфну структуру по межах шару, поблизу кордону з охолоджуючим середовищем, а в середині мікрокристалічну ферито-перлітну структуру, крім фериту та перліту присутні так само мартенсит, бейніт і залишковий

аустеніт. Формування аморфної структури по межах шару відбулося в результаті збільшення швидкості руху охолоджуючої води до 2 м/с і зменшенні температури води до 7°C при середніх значеннях товщини шару металу.

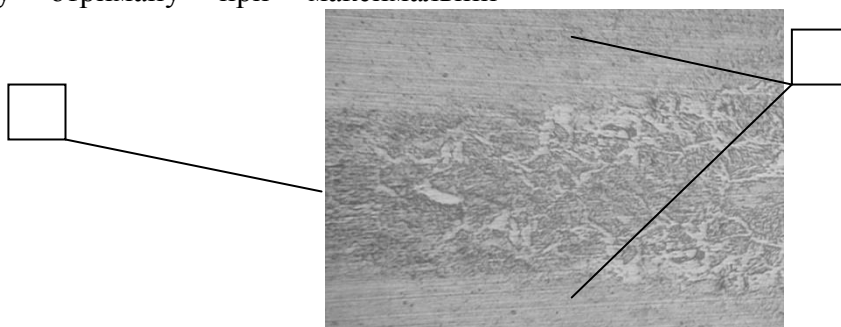


A – аморфная структура, К - кристалічна

Рис.2 – Аморфно-кристалічна структура масивного шару металу

У третьому випадку рис.3 при турбулентному режимі течії досліджуваний шар металу частково має аморфну структуру по межах шару, поблизу кордону з охолоджуючим середовищем, а в середині злитка мікрокристалічну ферито-перлітну структуру отриману при максимальній

швидкості руху води 3 м/с, мінімальній температурі води 5 °С і товщині шару металу 5 мм. Так як швидкість охолодження в цьому випадку буде мати максимальні значення, спостерігали збільшення аморфної фази металу.



A – аморфная структура, К - кристалічна

Рис.3 – Аморфно-кристалічна структура масивного шару металу, отримана при підвищеній швидкості охолодження

Виходячи з результатів експериментальних досліджень формування масивного шару з аморфною структурою можна досягти при мінімальних значеннях температури охолоджуючої води і максимальній швидкості руху охолоджуючої води, але основним фактором виступає значення товщини шару металу.

Термічна стійкість аморфних сплавів і процес затвердіння вивчали за допомогою диференціального скануючого калориметра Setaram DSC 131. Для обробки термограм використовували пакет програм, що входять в комплект калориметра. Обробку експериментальних даних проводили в

програмному пакеті для статистичного аналізу StatSoft Statistica 6.0 рис.4-5.

Максимальна степінь охолодження досягається у поверхонь шару, що примикають до охолоджуваних стінок форми, при максимальній швидкості руху охолоджуючої води у теплообмінних стінок форми і мінімальній температурі охолоджуючої води (рис.4-5), але все ж головним чинником який має найбільший вплив на степінь аморфізації виступає товщина розплаву. Температура кристалізації всередині шару вище, ніж у поверхонь шару. Тривалість процесу охолодження всередині шару в 5-10 разів більше [2].

Будівельні матеріали, конструкції та споруди

За допомогою металофізичних досліджень було зафіксовано, що деякі "аморфні" фази, що знаходяться всередині шару складаються з мікрокристалів, що в свою чергу доводить псевдоаморфність цих фаз.

Експериментальні дослідження технології лиття в охолоджувану форму вимагає великих витрат часу і матеріальних ресурсів, скоротити які дозволяє

застосування методів математичного моделювання та оптимізації.

Використовуючи сучасні методи та засоби математичного моделювання, можна вирішувати складні завдання теплопередачі, а так само досліджувати особливості технологічного процесу, виявляти якісну картину взаємодії різних факторів. Існує можливість розрахунковим шляхом встановити кількісні функціональні залежності [2].

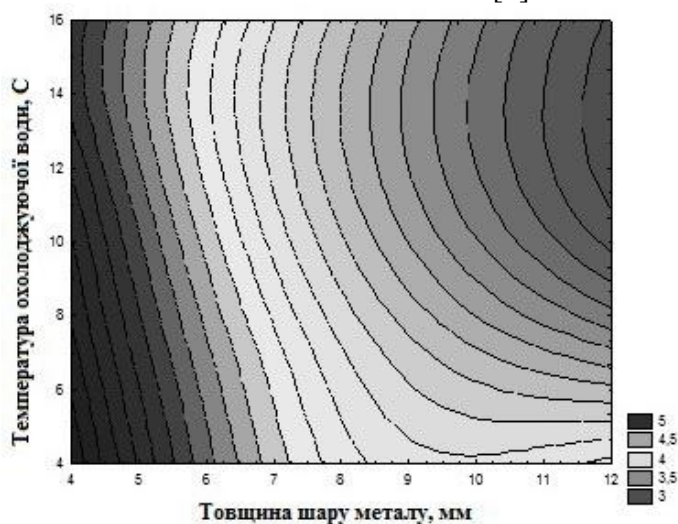


Рис.4 - Графік залежності ступеня аморфізації від температури охолоджуючої води та товщини шару металу

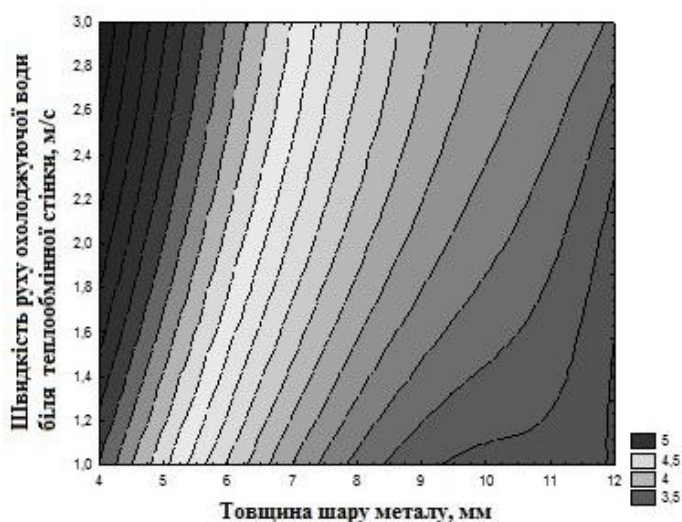


Рис.5 - Графік залежності ступеня аморфізації від швидкості руху охолоджуючої води біля теплообмінної стінки та товщини шару металу

Математичне формулювання задачі лиття металу в охолоджувану форму включає рівняння теплопровідності, що описують температурні явища при

відповідних крайових умовах. Перший крок починається з задавання виду і розмірності моделі (1D, 2D, або 3D) [3].

При розгляді спільного вирішення моделі загальної теплопередачі і моделі слабо стисливої рідини Нав'є-Стокса в стартовому меню слід вибрати 2D (General heat transfer) та 2D задачу (Weakly Compressible Navier-Stokes). Побудована за вищевказаним алгоритмом модель процесу лиття металу в охолоджувану форму дає графічне рішення, на якому ми можемо бачити розподіл температур (температурне поле), напрямок ліній струму, градієнт температур.

Таким чином, розподіл температури в злитку, що твердне визначається рішенням

системи рівнянь (1) - (2) з відповідними крайовими умовами [3].

Для вирішення цих рівнянь необхідно сформулювати початкові і граничні умови, тобто розподіл температур в початковий момент і умови теплообміну з навколишнім середовищем.

Необхідною умовою вирішення рівнянь є знання теплофізичних властивостей металів і сплавів при високих температурах: теплоємності, теплопровідності і теплоти затвердіння (стеклування).

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-k\nabla T) = Q + q_s T, \quad (1)$$

де q_s - коефіцієнт поглинання, Вт/м³·К
 Q - джерело тепла, Вт/м³
 k - коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К
 T - температура, К
 ρ - густина, кг/м³
 C_p - теплоємність при постійному тиску, Дж/кг·К
 ∇ - Оператор Набла;

Рівняння Нав'є-Стокса

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u\nabla)u = \nabla \left[-pI + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)I \right] + F$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (2)$$

ρ - густина, кг/м³
 η - динамічна в'язкість, Па·с
 k_{dv} - об'ємна в'язкість, Па·с
 u - швидкість, м/с.

В якості модельного сплаву був обраний сплав, що володіє гарною схильністю до аморфізації, внаслідок вмісту в складі сплаву легко-аморфізуємих елементів, таких як цирконій Zr.

З попередніх досліджень відомо, що товщина розплаву, при формуванні аморфної структури значно впливає на властивості і

структуру металів і сплавів. Виходячи з цього, в якості досліджуваних, були обрані дві охолоджувані форми з різними розмірами, що в свою чергу визначало товщину розплаву і можливість отримання аморфної структури. У табл.1 наведені теплофізичні властивості досліджуваного сплаву.

Таблиця 1. Теплофізичні властивості досліджуваного сплаву

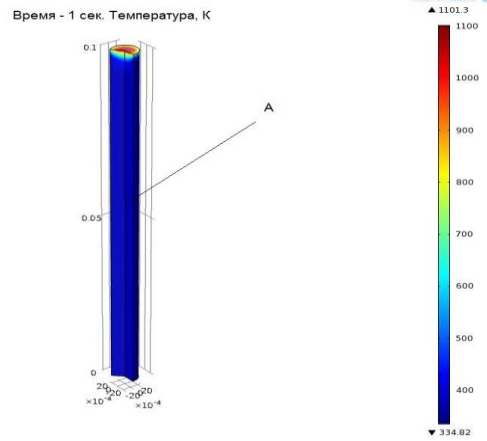
Сплав	Температура плавлення, К	Температура переходу в аморфний стан, К	Густина сплаву, кг/м ³	Теплоємність сплаву, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К
Cu ₄₅ Ti ₃₅ Zr ₂₀	1063	683	6900	385	340

Сплав системи Cu₄₅Ti₃₅Zr₂₀ від інших масивних аморфних сплавів відрізняється високою твердістю, міцністю та термічною стабільністю. При збільшенні вмісту Zr до 18% термічна стабільність сплаву зростає з 690К до 815 К, що істотно збільшує область застосування даного виду сплавів. Формування аморфної структури цього сплаву досить неоднозначний процес. Умови

для вирішення теплової задачі лиття сплаву Cu₄₅Ti₃₅Zr₂₀ наведені в табл.2. Результати моделювання у вигляді графіків і полів розподілу температур наведені на рис.6-11. Отримані графіки дають ефективну оцінку інтенсивності тепловіддачі під час процесу лиття, що дає можливість оцінити і прогнозувати здатність сплавів до аморфізації структури.

Таблиця 2. Параметри для вирішення теплової задачі лиття сплаву Cu₄₅Ti₃₅Zr₂₀

Назва параметра	Значення параметра
Температура розплаву перед процесом лиття	T _{in} = 1063 К
Температура на стінках охолоджуваної форми	T _к = 373, 673 К
Швидкість лиття	v _{cast} = 1,6 мм/с
Густина розплаву	ρ=6900 кг/м ³
Питома теплоємність металу	C _p = 385 Дж/(кг·К)
Динамічна в'язкість	η=0,0434 Па·с
Приховане тепло	dH=205 кДж/кг
Коефіцієнт теплопровідності	k=340 Вт/м·К
Інтервал виміру процесу лиття	0-1 сек
Розмір форми (товщина виливки): висота × діаметр,	100×3, 100×10



A – аморфна структура

Рис.6 – Температурне поле розплаву $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ в охолоджуваній формі

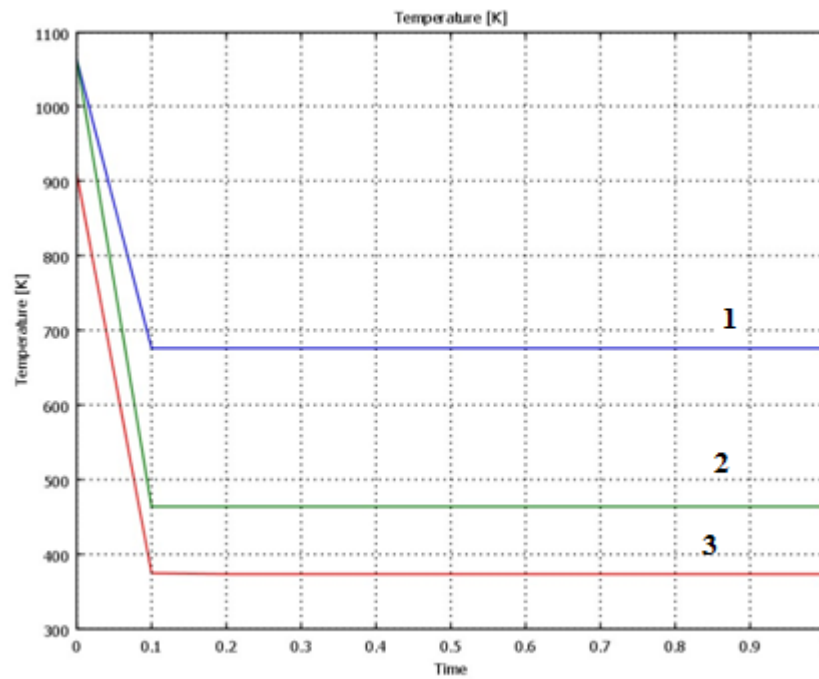


Рис.7 - Розподіл температури в сплаві $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ при температурі на стінках форми 373 K

1 – центр литва, 2 – поблизу охолоджуваної стінки форми, 3 - поблизу кордону з охолоджувальним середовищем.

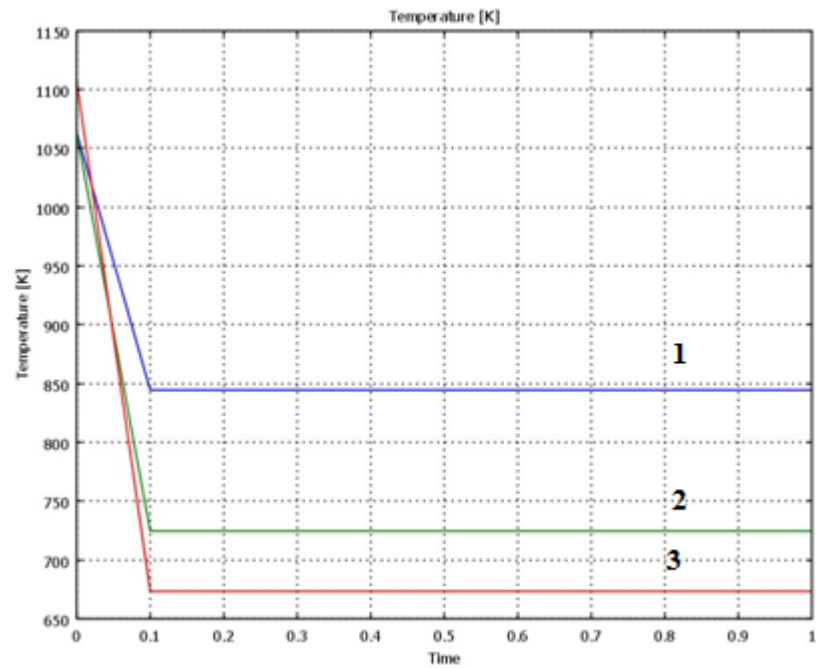
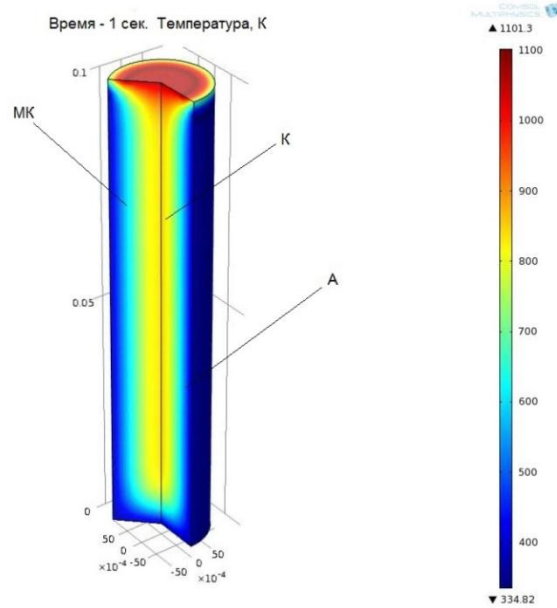


Рис.8 - Розподіл температури в сплаві $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ при температурі на стінках форми 673 K



А – аморфна структура, МК – мікрокристалічна, К - кристалічна
Рис.9 – Температурне поле розплаву $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ в охолоджуваній формі

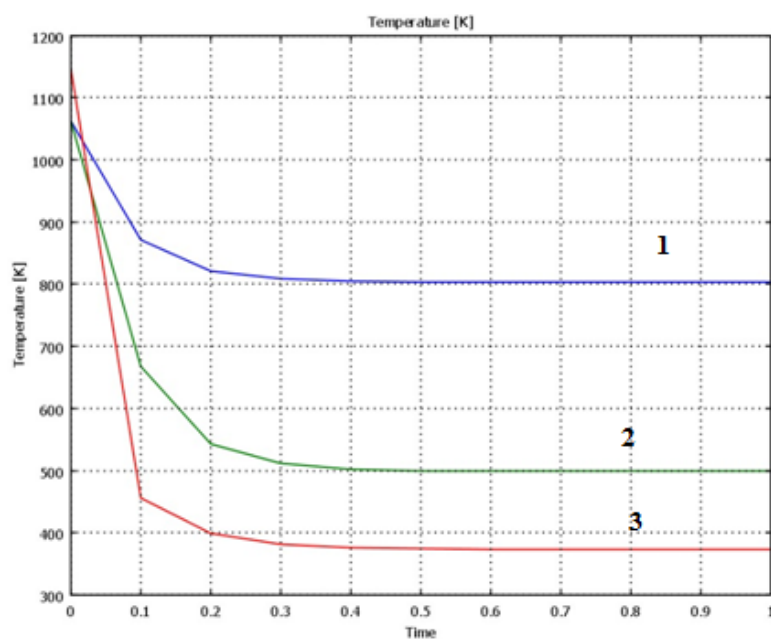


Рис.10 - Розподіл температури в сплаві $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ при температурі на стінках форми 373 К

1 – центр литво, 2 – поблизу охолоджуваної стінки форми, 3 - поблизу кордону з охолоджувальним середовищем.

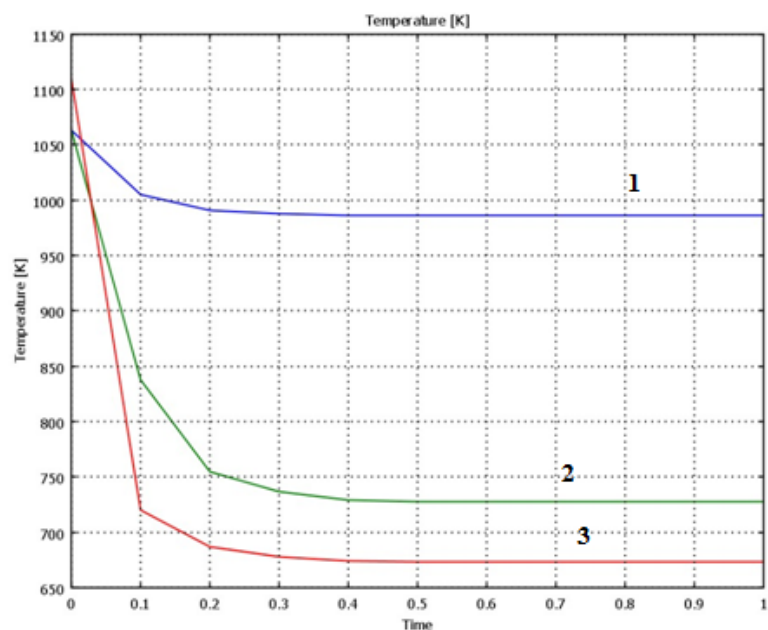


Рис.11 - Розподіл температури в сплаві $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ при температурі на стінках форми 673 К

З представлених графіків рис.6-8 видно, що в інтервалі 1 секунди відбувається надшвидке охолодження металу. Зіставляючи дані графіки можна зробити висновок про те, що формування аморфної структури (А) (рис.6) по всьому шару металу можливо тільки при максимальних швидкостях охолодження на стінках

охолоджуваної форми рис.7. Решта графіки рис.9-11 свідчать про те, що зі зменшенням швидкості охолодження відбувається лише часткова аморфізація поблизу охолоджуваної стінки форми, що призводить до утворення як аморфної (А), так і кристалічної (К) структури (рис. 2-3). Ближче до центральної частини злитка в

результаті меншої тепловіддачі формується мікрокристалічна (МК) структура металу. У центральній частині злитка навіть при максимальній мірі охолодження формування аморфної структури не відбувається. Наявність конвективних потоків в середині злитка призводить до збільшення тепловіддачі і підвищення швидкості охолодження, внаслідок чого вдається досягти мікрокристалічної структури металу, з поліпшеними механічними властивостями.

Для сплаву $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$ критична швидкість охолодження склала 10^2 - 10^3 К/с що дало можливість отримати з розплаву зразки з аморфною структурою, що підтверджується металофізичними, рентгеноструктурними дослідженнями. Створювані при такому загартуванні аморфно-кристалічні структури володіють хорошими механічними властивостями, твердість сплаву складає 750 HV.

Висновки

Максимальна степінь охолодження під час процесу лиття металу в форму, що охолоджується досягається у поверхонь шару, що примикають до охолоджуваних стінок форми. Температура кристалізації всередині шару вище, ніж у поверхонь шару.

Тривалість процесу охолодження всередині шару в 5-10 разів більше.

Отримані експериментальні та розрахункові дані показали, що при використанні методу лиття в охолоджувану форму для отримання аморфних виробів товщиною кілька міліметрів необхідні сплави з досить низькою критичною швидкістю охолодження, менше 1000 К/с. Отримання масивних аморфних зразків можливо при їх товщині до декількох міліметрів при застосуванні даного експериментального методу лиття.

Визначено два головних фактори, які обмежують товщину аморфних виробів: Зниження коефіцієнта тепловіддачі від розплаву до форм при збільшенні товщини виробів і локальна кристалізація розплаву, яка залежить від об'єму лиття і збільшується при наближенні товщини виробу до критичної.

Найбільший інтерес з досліджуваних нами сплавів представляють масивні аморфні сплави системи мідь-титан-цирконій. Від інших масивних аморфних сплавів вони відрізняються високою твердістю, міцністю і термічною стабільністю. При збільшенні вмісту Zr до 18% термічна стабільність сплаву зростає з 690К до 815 К, що істотно збільшує область застосування даного виду сплавів.

Література

1. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Analysis of thermal peculiarities of alloying with special properties, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No2, p.p. 15-20.
2. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Research the energyefficient process of high-speed casting of metal between the cooling rolls, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No5, p.p. 68-72.
3. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Mathematical modeling of the casting process in Comsol 3.5a package, Metallurgical and Mining Industry, 2015, No1, p.p. 132-140.

Павленко Анатолій Михайлович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Тел. 05322-7-38-57/ e-mail: am.pavlenko@i.ua

Усенко Богдан Олегович, аспірант, кафедра теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, тел. 05322-7-38-57, / e-mail assistant_pntu@ukr.net

Pavlenko Anatoliy, Doctor of Sciences, professor, Department of «Heat and gas supply, ventilation and heat power engineering», Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

Tel. 05322-7-38-57 e-mail am.pavlenko@i.ua

Usenko Bohdan, postgraduate, Department of «Heat and gas supply, ventilation and heat power engineering», Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

Tel. 05322-7-38-57, / e-mail assistant_pntu@ukr.net

Стаття поступила 20.05.2015р.

УДК 629.7.017

ЭКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДВИГУНІВ

В.І. Рубльов, Г.В. Білвол

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.И. Рублев, А.В. Беловол

EXERGY ANALYSIS OF THE ENGINE

V.I. Rublev, H.V. Bilovol

Зроблений аналіз термодинамічних і сучасних ексергетических методів різних процесів і систем. Проведений ексергетичний аналіз двох типів газотурбінних установок, які працюють по простому циклу і регенеративному циклі. Проведений розрахунок ексергії на вході і виході в окремих елементах газотурбінної установки, а також втрати ексергії в цих елементах.

Ключові слова: Термодинамічний аналіз, ексергія, газотурбіна установка.

Сделан анализ термодинамических и современных эксергетических методов различных процессов и систем. Произведен эксергетический анализ двух типов газотурбинных установок, которые работают по простому циклу и регенеративному циклу. Произведен расчет эксергии на входе и выходе в отдельных элементах газотурбинной установки, а также потери эксергии в этих элементах.

Ключевые слова: Термодинамический анализ, эксергия, газотурбинная установка.

Thermodynamic analysis plays an important role for the analysis of any process, along with the technical and economic analysis. Almost all indicators take into account the thermodynamic efficiency of the energy conversion process according to the first law of thermodynamics, and does not take into account the features of the second law. According to the second law of thermodynamics, the energy can not be completely converted into useful work. But there is a figure with which it is possible to take into account this feature - Exergy. This indicator allows to consider features of the second law of thermodynamics and highlight the part of the energy that can not be used as a result of gas-dynamic phenomena, and makes it possible to quantify the influence of nonequilibrium thermodynamic processes in the energy conversion efficiency. The analysis of thermodynamic and modern exergetically methods of various processes and systems. Produced exergy analysis of two types of gas turbines, which operate on a simple cycle and regenerative cycle. The calculation of exergy input and output in separate elements of the gas turbine, as well as the loss of exergy in these elements.

Keywords: Thermodynamic analysis, exergy, gas turbine plant.

Вступ. Термодинамічний аналіз відіграє важливу роль для аналізу будь якого процесу, поряд з технічним і економічним аналізом. Практично всі показники термодинамічної ефективності процесу враховують перетворення енергії згідно

першого закону термодинаміки, і не враховують особливості другого закону. Згідно другого закону термодинаміки енергія не може бути повністю перетворена в корисну роботу. Но існує показник, за допомогою якого є можливість врахувати цю

особливість – ексергія. Даний показник дозволяє врахувати особливості другого закону термодинаміки та виділити ту частину енергії, яка не може бути використана внаслідок газодинамічних явищ, та дає можливість кількісно визначити вплив нерівноважності термодинамічних процесів на ефективність перетворення енергії. Це дозволяє аналізувати ступінь термодинамічної досконалості того чи іншого окремого елемента будь якої установки і не вимагає попередньої оцінки працездатності всієї установки в цілому [1-4].

Мета. Метою даної роботи являється розробка підходу та порядок розрахунку ексергії газового потоку, палива і втрати ексергії у різних вузлах газотурбінних установок та зробити порівняльний аналіз цих установок, що працюють за різними схемами.

Основна частина. Робота, яка здійснюється системою, має максимальне значення при умові повної оберталості усіх процесів. При цьому максимальна зміна ентропії усіх тіл, які задіяні у процесі, повинні дорівнювати нулю. У цьому випадку максимальна робота дорівнює:

$$l_0^{\max} = (i - i_0) - T_0(s - s_0) + \left(q - T_0 \int \frac{dq}{T} \right) \quad (1)$$

де $(i - i_0)$ - зміна ентальпії, дійсна та при температурі навколишнього середовища T_0 ;

$(s - s_0)$ - зміна ентропії, дійсна та при температурі навколишнього середовища T_0 ;

T_0 - температура, відповідає рівновазі з навколишнім середовищем;

q - кількість теплоти яку отримує робоче тіло.

При відсутності джерела первинної теплоти робота може бути здійснена за рахунок власної енергії робочого тіла, яке проходить скрізь систему. У цьому випадку формула (1) бути мати вигляд [5]:

$$E = (i - i_0) - T_0(s - s_0) \quad (2)$$

Ця функція працездатності робочого тіла у проточній системі і получила назву ексергії.

Якщо існує кінцева різниця температур то передача теплоти є незворотним процесом, яка зв'язана з

підвищенням ентропії та втратою роботи. Таким чином, ексергетичний ККД буде основним показником ексергетичного методу, який дорівнює відношенню ексергії, корисно відведеної з установки, до ексергії підведеної до неї [1]:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{ex} - E_{вих}}{E_{ex}} 100\% . \quad (3)$$

де E_{ex} – ексергія на вході у систему;

$E_{вих}$ – ексергія на виході з системи.

Розглянемо два циклу ГТУ з точки зору розподілу втрат енергії і ексергії в різних

агрегатах і процесах перетворення теплоти в роботу, складових цей цикл. Один цикл ГТУ працює за простою схемою, а другий цикл ГТУ – з рекуператором (рис. 1-2)

Теплові двигуни

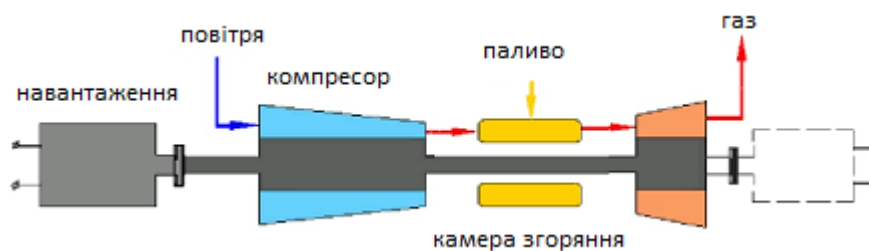


Рис. 1 - Конструктивна компоновка одновалової ГТУ

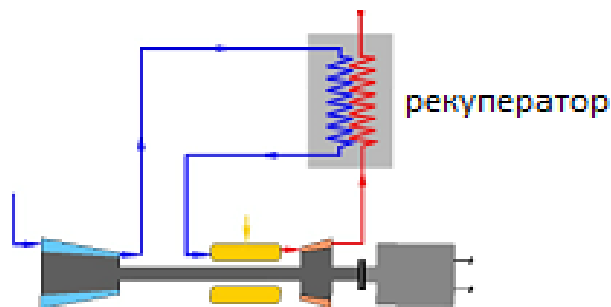


Рис. 2 - Конструктивна компоновка одновалової ГТУ з рекуператором

Основні характеристики ГТУ представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Основні характеристики ГТУ

тиск повітря на вході в компресор	$p_1=0,1$ МПа
тиск повітря на виході з компресора	$p_2=1,95$ МПа
внутрішній відносний ККД турбіни	$\eta_{0i}^m = 0,86$
внутрішній відносний ККД компресора	$\eta_{0i}^k = 0,85$
ККД камери згоряння	$\eta_{КЗ} = 0,98$
механічний ККД	$\eta_m = 0,98$
ККД електричного генератора	$\eta_e = 0,97$
температура повітря на вході в компресор	$T_1=15^\circ\text{C}$
температура на вході в турбіну	$T_3=1200^\circ\text{C}$
теплота згоряння палива	$Q_p^H = 35350$ кДж/кг
температура навколишнього середовища	$T_0=15^\circ\text{C}$
тиск навколишнього середовища	$p_0=0,1$ МПа

Результати розрахунку ексергетичних втрат в окремих вузлах ГТУ представлені у таблицях 2-3.

Таблиця 2 - Розподіл ексергії по основних вузлах ГТУ, який працює за простим циклом

№ п/п	Найменування вузла	Ексергія, кДж/кг			Ексергетичний ККД вузла
		На вході	На виході	Втрата	
1	Камера згоряння	424,2	1048,72	255,2	0,7097
2	Турбіна	1048,72	233,55	48,49	0,9405
3	Компресор	0	424,2	452,91	0,9366
4	Вихідний пристрій			233,55	

Теплові двигуни

Таблиця 3 - Розподіл ексергії по основних вузлах ГТУ, який працює з рекуператором

№ п/п	Найменування вузла	Ексергія, кДж/кг			Ексергетичний ККД вузла
		На вході	На виході	Втрата	
1	Камера згоряння	498,6	1126	243,52	0,7121
2	Турбіна	1126	229,2	28,8	0,9638
3	Рекуператор	425,3	498,6	73,28	0,456
4	Компресор	0	425,3	28,8	0,9366
5	Вихідний пристрій			36,4	

Ексергетичний ККД ГТУ знаходився за формулою:

$$\eta_{ex}^{ГТУ} = 1 - \frac{\sum \Delta E}{E_{нал}}, \quad (4)$$

де $\sum \Delta E$ - сума втрат в усіх елементах установки;

$E_{нал}$ - ексергія палива.

Висновок:

- в результаті розрахунків визначені ексергетичні втрати в елементах установок, при цьому максимальні втрати ексергії спостерігаються у камері згоряння;

- на підставі проведеного аналізу визначена ексергетична ефективність розглянутих установок, яка складає $\eta_{ex}^{ГТУ} = 0,32$ - для ГТУ, який працює за простим циклом, та $\eta_{ex}^{ГТУ} = 0,49$ - для ГТУ, який працює з рекуператором.

Список використаних джерел

1. Бродянский В.М. Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие [Текст] / В.М. Бродянский, Г.П. Верхивкер, Я.Я. Карчев. – К.: Наукова думка, 1991. – 361 с.
2. Ковтун В.В. Применение эксергетического метода для оценки эффективности работы теплоэнергетических установок, утилизационного оборудования и схем утилизации вторичных энергоресурсов [Текст] / В.В. Ковтун – К.: УМК ВО, 1989. – 76 с.
3. Самсонов А.И. Эксергетический анализ работы тепловых машин. Противоречия и неточности в учебниках по технической термодинамике. [текст] / А.И.Самсонов // Кораблестроение, океанотехника, вопросы экономики. Выпуск 25. – Владивосток. - 2002. - С. 21-22.
4. Эксергетический метод и его приложения [Текст] / под ред. В.М. Бродянского. - М. : Мир, 1967. - 248 с.
5. Крутов В.И. Техническая термодинамика [Текст] / В.И. Крутов – М.: Высшая школа, 1981. – 439 с.

Рецензент д-р техн. наук. професор Фалендиш А.П.

Рубльов Володимир Іванович, к.т.н., доцент кафедри теплотехніки і теплових двигунів Української державної академії залізничного транспорту, м. Харків, Україна, Тел. (057)-730-10-78. E-mail: rublik69@ukr.net.

Біловола Ганна Володимирівна, к.т.н., доцент кафедри теплотехніки і теплових двигунів Української державної академії залізничного транспорту, м. Харків, Україна, Тел. (057)-730-10-78. E-mail: annabel731@gmail.com

Rublev Vladimir Ivanovich, c-te science, department of operation and maintenance of rolling stock Ukraine State Academy of Railway Transport. Tel. (057)-730-10-78. E-mail: rublik69@ukr.net.

Bilovol Hanna Volodymyrivna, c-te science, department of operation and maintenance of rolling stock Ukraine State Academy of Railway Transport, Tel. (057)-730-10-78. E-mail: annabel731@gmail.com

Стаття постуила 15.03.2015

УДК 629.083

НАНЕСЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ СОДЕРЖАЩЕГО ДИСУЛЬФИД МОЛИБДЕНА

Д-р техн. наук С. С. Тимофеев

НАНЕСЕННЯ АНТИФРИКЦІЙНОГО ПОКРИТТЯ ЩО МІСТИТЬ ДИСУЛЬФІД МОЛІБДЕНУ

Д-р техн. наук С. С. Тимофеев

APPLICATION OF ANTIFRICTION COATINGS CONTAINING MOLYBDENUM DISULPHIDE

Doct. of engineering S. S. Timofeyev

В статье представлен один из путей повышения уровня эксплуатационной надёжности дизельной топливной аппаратуры, а именно плунжерных пар топливных насосов. Предлагается технологический подход в восстановлении работоспособности деталей нанесением антифрикционного покрытия содержащего дисульфид молибдена методом вакуум-плазменного напыления. Применение данной технологии позволит увеличить эксплуатационные свойства и ресурс деталей плунжерных пар.

Ключевые слова: антифрикционное покрытие, дисульфид молибдена, вакуум-плазменная технология, ресурс.

У статті представлений один із шляхів підвищення рівня експлуатаційної надійності дизельної паливної апаратури, а саме плунжерних пар паливних насосів. Пропонується технологічний підхід у відновленні працездатності деталей нанесенням антифрикційного покриття, що містить дисульфід молибдену методом вакуум-плазмового напылення. Застосування даної технології дозволить збільшити експлуатаційні властивості і ресурс деталей плунжерних пар.

Ключові слова: антифрикційне покриття, дисульфід молибдену, вакуум-плазмова технологія, ресурс.

One way to improve the operational reliability of diesel fuel equipment, especially its probability of failure-free operation is to improve the quality of its service. As a result, numerous studies have established that in the operation of transport diesel fuel pumps plunger assemblies are subjected primarily to abrasion. When restoring performance parts of tribotechnical compounds promising is the use of method allows to obtain anti-friction wear-resistant coatings, with specified performance characteristics on the working surface of such parts.

The article presents a one of the ways to improve the operational reliability of diesel fuel equipment, namely fuel pumps plunger assemblies. It is proposed technological approach in recovery working capacity of parts of application of antifriction coatings containing molybdenum disulfide by vacuum plasma spraying.

Application of this technology will increase the performance characteristics and resource of plunger assemblies.

Keywords: anti-friction coating, molybdenum disulfide, vacuum-plasma technology, resource.

Постановка проблемы. Одним из безотказной работы, является повышение путей повышения уровня эксплуатационной качества её ремонта. В результате надёжности дизельной топливной многочисленных исследований установлено, аппаратуры, особенно вероятности её что в процессе эксплуатации транспортных

дизелей плунжерные пары топливных насосов подвергаются, главным образом, абразивному изнашиванию. При восстановлении работоспособности деталей триботехнических соединений, перспективным является применение способов позволяющих получать антифрикционные износостойкие покрытия, с заданными эксплуатационными свойствами на рабочей поверхности таких деталей.

Анализ последних исследований и публикаций. Материалы покрытий, обладающих повышенными антифрикционными свойствами должны отличаться низкой микротвёрдостью и высокой пластичностью. Этими свойствами в достаточной степени обладают такие материалы как медь, латунь, а также сульфиды металлов, в частности, дисульфид молибдена MoS_2 [1].

Покрытия, содержащие сульфиды молибдена, отличаются наиболее высокими антифрикционными свойствами [2]. В настоящее время такие покрытия наносятся на поверхность деталей пар либо механическим трением, либо детонационным способом. Покрытия, получаемые этими способами, очень тонки и легко изнашиваются.

Опыт нанесения покрытий из сульфидов молибдена методами вакуум-плазменной технологии отсутствует как в отечественной, так и в зарубежной литературе [3]. Это объясняется тем, что сульфиды молибдена представляют сыпучий материал с низкой диэлектрической проводимостью, что не позволяет применять его для изготовления торцевых катодов.

Цель исследования. Разработать технологический подход вакуум-плазменного нанесения антифрикционного покрытия из дисульфида молибдена.

Основной материал исследования. Попытки вакуум-плазменного нанесения покрытий, содержащих дисульфид молибдена, предпринятые рядом авторов [3] не привели к положительному результату. Несмотря на то, что в теоретическом плане плазмо-химический синтез молекулы MoS_2 из молибденового испарителя в среде сероводорода не вызывает трудностей практической его реализации с надёжностью, необходимой для

промышленного внедрения осуществить не удаётся. В полученном таким образом конденсате содержатся S; MoS ; Mo ; MoO_2 ; FeS и очень незначительные включения MoS_2 . Кроме того, применяемый при этом сероводород токсичен и крайне неудобен с точки зрения вакуумной гигиены.

Принципиальное отличие разработанного способа нанесения покрытий из MoS_2 от ранее существовавших, состоит в отказе от плазмохимического синтеза. В этом способе в плазмообразующую среду непосредственно с эродируемого катода вносятся уже сформированные молекулы данного вещества.

Практически реализовать этот процесс можно, применив катод, металлическая основа которого в значительной степени насыщена молекулами серы и молибдена. При проведении исследований использовался катод из меди, содержащей 50% включения дисульфида молибдена (MoS_2), изготовленный прессованием из порошковой смеси с последующим прогревом до температуры плавления меди.

При возбуждении дугового разряда на таком катоде, дисульфид молибдена легко испаряется с его поверхности с достаточной степенью ионизации и, частично разлагаясь, участвует в плазмообразовании. Следует отметить, что скорость распыления сульфида молибдена значительно выше скорости распыления меди. Поэтому в начальной стадии эксплуатации катода именно MoS_2 преобладает в составе плазмообразующего газа. Для стабилизации соотношения компонентов в плазмообразующей среде необходимо произвести приработку катода в течение 1–2 часов.

При эксплуатации катодов, изготовленных по предложенной технологии, в составе плазмообразующего газа возникает некоторое количество неконтролируемых примесей, основными из которых являются азот и кислород. Это обусловлено тем, что молекулы воздуха, адсорбированные гранулами порошковой смеси, растворяются в материале катода в процессе прессования и последующей термообработки.

Устранить указанные примеси можно, если изготовление катода производить горячим прессованием в вакууме. Однако такое усложнение технологии изготовления

катодов нужно считать нецелесообразным, т.к. указанные примеси не оказывают существенного влияния на антифрикционные свойства покрытия.

Оксиды меди, возникающие в плёнке, сами могут быть пластичными [4], а азот достаточно инертен к меди и связанному в молекуле MoS_2 молибдену.

Даже большое содержание азота в плазмообразующем газе (до 80% а.т.) не приводит к существенному изменению состава и свойств покрытия. Кроме того, приработка катода способствует его дегазации и значительно уменьшает содержание кислорода в плазмообразующей среде [5]. Применение указанных катодов позволяет получить покрытие, основными компонентами которого является медь и дисульфид молибдена.

На уровне примесей в плёнке покрытия присутствует свободная сера, молибден, его окись и нитрид молибдена. Заслуживает внимания тот факт, что скорость конденсации сульфида молибдена сильнее зависит от температуры подложки, чем скорость конденсации меди.

Это позволяет направленно влиять на соотношение основных компонентов в материале плёнки в процессе её формирования.

Так, при температурах 400–500⁰С скорость конденсации MoS_2 ниже скорости конденсации Cu , и этот элемент будет

доминирующим в поверхностном слое. При повышении температуры до 600–650⁰С преобладающим компонентом будет MoS_2 .

При дальнейшем повышении температуры подложки и одновременном повышении ускоряющих напряжений, скорость конденсации основных компонентов падает и становится соизмеримой со скоростью конденсации Mo и MoN . Всё это позволяет получать покрытия с заданным распределением компонентов по их толщине, свойства которых изменяются от износостойких до антифрикционных. Применение покрытий, содержащих сульфид молибдена, в 2–3 раза сокращает время стабилизации моментов трения и значительно повышает предельную нагрузку схватывания. Триботехнические свойства покрытия малочувствительны к материалам основы. Следует отметить, что покрытия, содержащие MoS_2 , значительно снижают энергонапряжённость контакта трения.

Выводы. Результаты исследований дают основание полагать, что разработанный технологический подход вакуум-плазменного нанесения покрытий из дисульфида молибдена позволит увеличить ресурс деталей плунжерных пар топливных насосов в несколько раз, при одновременном улучшении их эксплуатационных характеристик.

Список использованных источников

1. Загородских Б.П. Ремонт и регулирование топливной аппаратуры автотракторных и комбайновых двигателей / Б.П. Загородских, В.В. Хатьков. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 142 с.
2. Бахтиаров Н.И. Технология обработки прецизионных пар / Н.И. Бахтиаров, В.Е. Логинов. – М.: Машгиз, 1963. – 287с.
3. Кузнецов В.Д., Пашенко В.М. Фізико-хімічні основи створення покриттів: Навч. посібник. – К.: НМЦ ВО, 1999. – 176 с.
4. Кольцов В.Е., Стульнина Г.С., Ларин М.П. Перспективный метод создания коррозионностойких и износостойких покрытий на конструкционных сталях // Прогрессивные методы получения конструкционных материалов и покрытий, повышающих долговечность деталей машин. – Волгоград, 1990. – С. 58–59.
5. Токарев А.О. Упрочняющие металлические покрытия, полученные с применением источников энергии высокой концентрации / А.О. Токарев // Транссиб – 99: мат. науч.-практ. конф. / Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск, 1999. – С. 209–210.

Тимофеев Сергей Сергійович, доктор техн. наук, професор кафедри «Якість, стандартизація, сертифікація та технології виготовлення матеріалів» Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-49.

E-mail: fedcirina@yandex.ru.

УДК 662.931

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

А.П. Фалендыш, Л.А. Пархоменко, О.В. Клецкая, П.В. Рукавишников

ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДОПАЛИВНИХ КОТЛІВ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ.

А.П. Фалендиш, Л.О. Пархоменко, О.В. Клецька, П.В. Рукавішников

THE FEASIBILITY OF USING SOLID FUEL BOILERS FOR RAILWAY ENTERPRISES

A. Falendysh, L. Parkhomenko, O. Kletska, P. Rukavishnikov

Сделан анализ структуры расходов условного топлива и прогнозирование потребления различных видов котельно-печного топлива. Для целесообразности использования других видов топлива в котельных был сделан прогноз стоимости энергоресурсов на производство тепловой энергии. Выполнена классификация отопительных котлов при использовании разного вида топлива. Рассмотрены основные технические характеристики разных типов котлов, их преимущества и недостатки. Определена целесообразность использования твердотопливных котлов на предприятиях железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: *Отопительный котел, котельно-печное топливо, тепловая энергия, прогнозирование, коэффициент полезного действия.*

Зроблений аналіз структури витрат умовного палива та прогнозування споживання різних видів котельно-печного палива. Для доцільності використання інших видів палива в котельнях був зроблений прогноз вартості енергоресурсів на виробництво теплової енергії. Виконана класифікація опалювальних котлів при використанні різного виду палива. Розглянуто основні технічні характеристики різних типів котлів, їх переваги та недоліки. Визначено доцільність використання твердопаливних котлів на підприємствах залізничного транспорту.

Ключові слова: *Опалювальний котел, котельно-печне паливо, тепла енергія, прогнозування, коефіцієнт корисної дії.*

The analysis of the costs of fuel oil, on the basis of Ukrzaliznytsia, which showed a tendency to reduce the consumption of coal, oil and natural gas in recent years. The analysis of the cost structure of conventional fuel and forecasting of consumption of various types of fuel oil. For the feasibility of using other types of fuel in the boiler was made the forecast cost of energy for heat generation. Made classification of boilers using different types of fuel. The main technical characteristics of the different types of boilers and their advantages and disadvantages. Analysis of the structure building area Ukrzaliznytsia enterprises, namely enterprises locomotive economy, carload economy showed prospects of solid fuel boilers: brigadier house locomotive crews;

Теплові двигуни

checkpoints road crossings, stations, remote areas of railway transport determine the feasibility of using solid fuel boilers at the enterprises of railway transport.

Keywords: Boiler, boiler and furnace fuels, thermal energy, forecasting, coefficient of efficiency.

Введение. В настоящее время на предприятиях железнодорожного транспорта для получения тепловой энергии используются, в основном, котельные большой мощности, работающие на газу. Они используются не только для получения тепловой энергии для нужд предприятия, но и для отопления прилегающих поселков и городов.

В сложившейся ситуации, при резком уменьшении объемов перевозок и ремонтных работ, данные котельные используются не на полную мощность, что приводит к увеличению себестоимости тепловой энергии. Если учесть еще дефицит и дороговизну газа, то целесообразность использования газовых котельных большой мощности вызывает сомнения. Поэтому обоснование использования твердотопливных котлов длительного горения небольшой мощности в настоящее время является актуальным.

Цель. Определение целесообразности использования

отопительных твердотопливных котлов длительного горения малой мощности на предприятиях железнодорожного транспорта.

Основная часть. Анализ расходов на нужды котельной, на основе данных Укрзалізнички за 1997-2014 гг. (рис. 1), показывает, что потребление угля, мазута и природного газа за последнее время имеет тенденцию до уменьшения потребления. Но события, происходящие в нашей стране с 2014 года показывают, что полученные регрессии для прогнозирования в настоящее время использовать нельзя. Потребление газа резко уменьшается и прогнозируемое значение не соответствует полученной регрессионной зависимости. Поэтому для анализа и прогнозирования расхода котельно-топочного топлива за базовый брались данные 2013 года. Прогнозирование выполнялось экспертным методом, с корректировкой статистических данных Укрзалізнички.

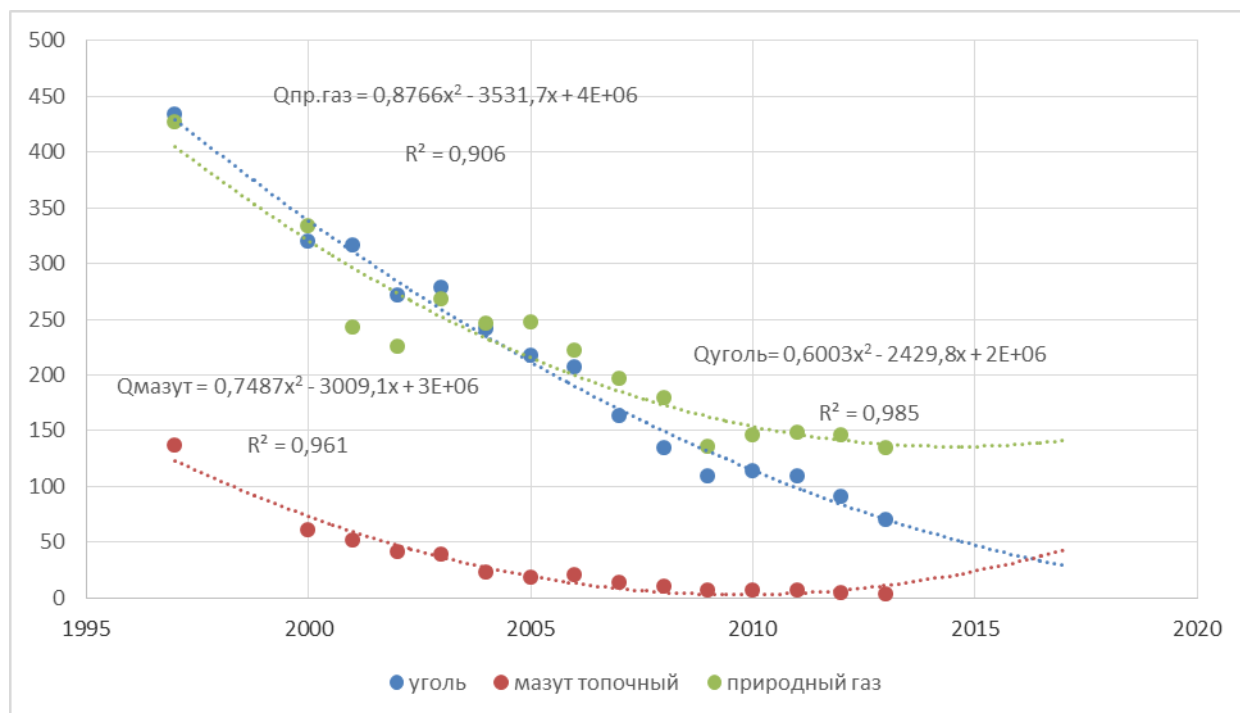


Рис.1 Прогнозирование потребления различных видов котельно-печного топлива.

Теплові двигуни

Вначале был сделан анализ структуры расходов условного топлива 2013 года (рис. 2), который показал, что расход условного топлива на производство тепловой энергии составляет 145,4 т.у.т., на отопление

пассажирских вагонов – 27,1 т.у.т., на жилищно-коммунальное потребление – 26,6 т.у.т., на нагрев металла и литье – 1,9 т.у.т. и на другие производственные потребности – 28,1 т.у.т.

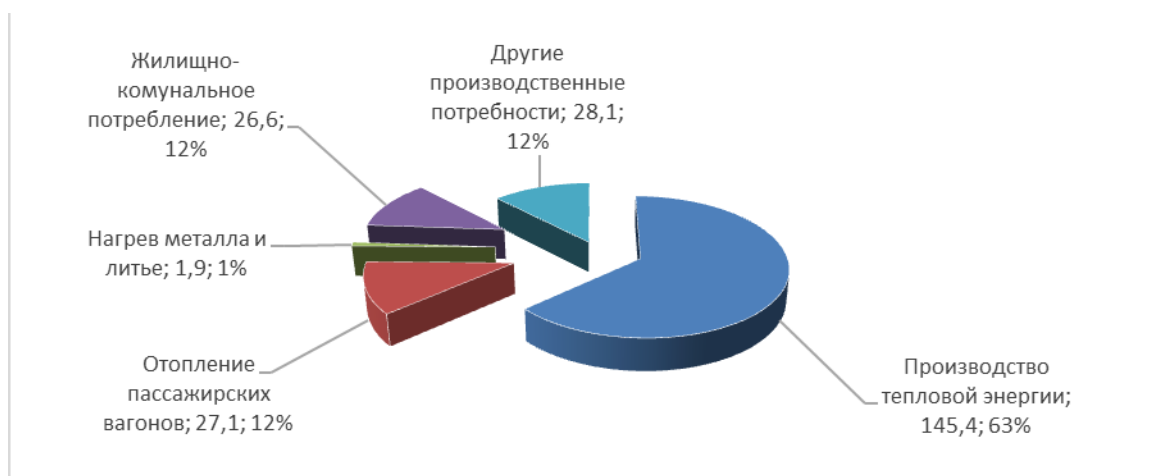


Рис. 2. Структура расходов условного котельно-топочного топлива за 2013 г.

Так как идет модернизация и обновление пассажирских вагонов, в которых применяется электрическое отопление, то прогнозируемое потребление котельно-топочного топлива на отопление пассажирских вагонов составляет 7,1 т.у.т. С уменьшением объема работ прогнозируется уменьшение потребления топлива на производство тепловой энергии до 124 т.у.т., на нагрев металла и литье до 1,5 т.у.т., на жилищно-коммунальное потребление до 26,5 т.у.т. и на другие производственные потребности потребление тонн условного топлива составит 11 т.у.т. (рис. 3).

Анализ структуры площадей зданий предприятий Укрзалізничці, а именно предприятий локомотивного хозяйства, вагонного хозяйства, станций и узлов и др., показал, что около 30 % помещений имеют площадь менее 800 м². Поэтому эти здания можно отапливать твердотопливными котлами небольшой мощности, и расходы топлива на жилищно-коммунальное потребление были разделены на расходы потребления топлива котлами мощностью более 100 кВт и котлами мощностью менее 100 кВт.

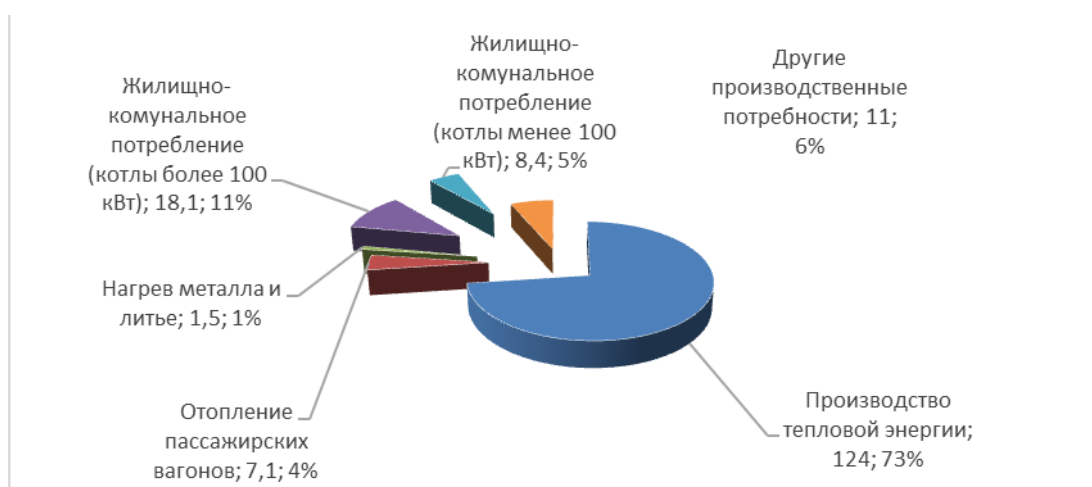


Рис. 3. Прогнозная структура расходов условного котельно-топочного топлива на 2015 г.

Теплові двигуни

Для использования других видов топлива в котельных был сделан прогноз стоимости энергоресурсов на производство тепловой энергии. За базовый были взяты данные 2013 года (рис. 4). На основании прогнозных данных стоимости топлива на 2015 г. (рис. 5) была построена диаграмма стоимости 1 Гкал тепловой энергии от котельных, использующих различные виды топлива. Из

нее видно, что стоимость 1 Гкал на природном газе увеличится более чем в 2,5 раза и будет составлять около 1500 грн., в тоже время стоимость 1 Гкал на дровах будет почти на 1300 грн. меньше относительно природного газа. В 2013 году разница составляла около 400 грн., что еще раз говорит о целесообразности внедрения современных твердотопливных котлов.

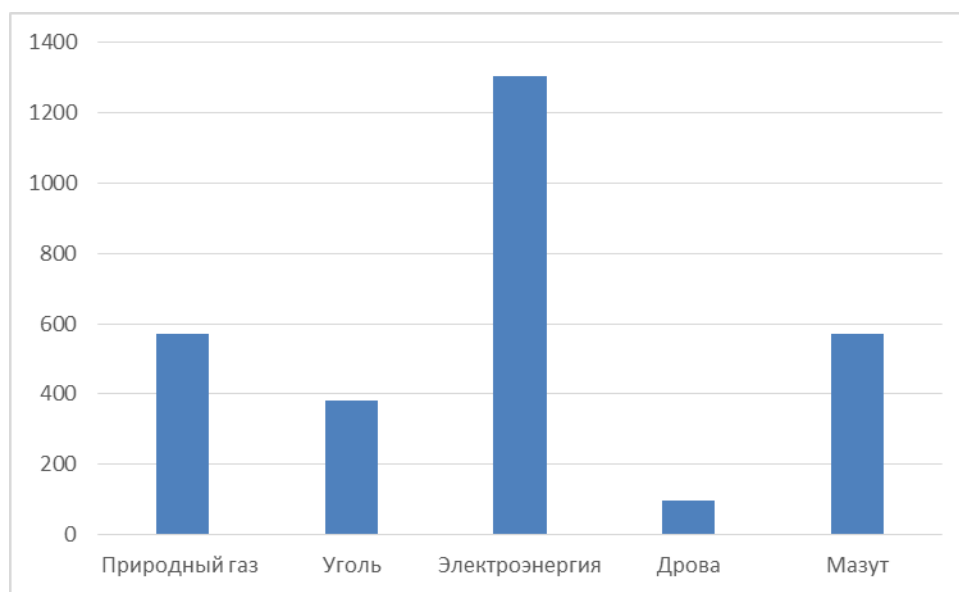


Рис. 4. Диаграмма стоимости 1 Гкал тепловой энергии от котельных на различных видах топлива за 2013 г.

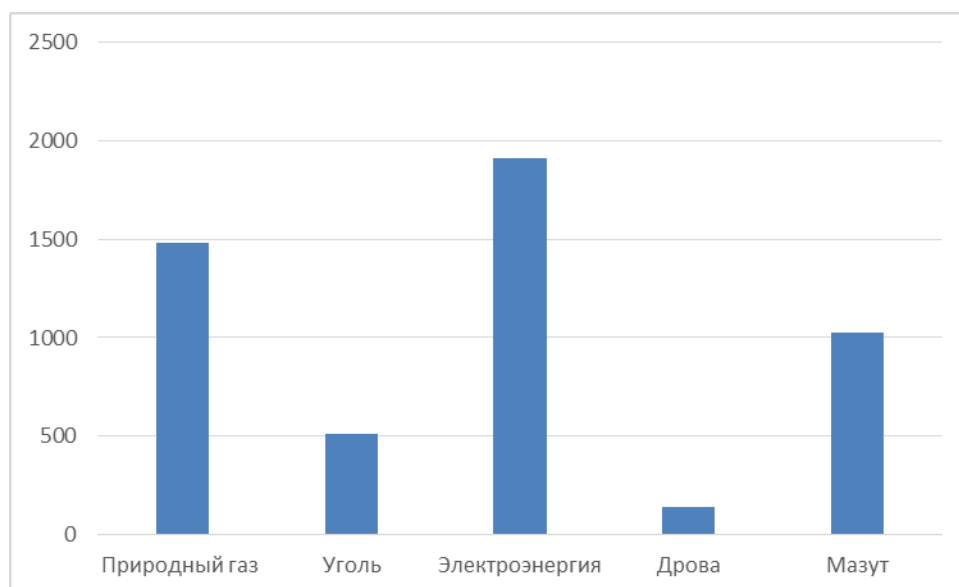


Рис. 5. Диаграмма стоимости 1 Гкал тепловой энергии от котельных на различных видах топлива в 2015 г.

На сегодняшний день на рынке отопительных систем присутствует множество котлов отопления отечественного

и импортного производства, которые отличаются размерами, формами, типом топлива, эксплуатационными

характеристиками. Была сделана виду потребляемого топлива (рис. 6).
классификация отопительных котлов по

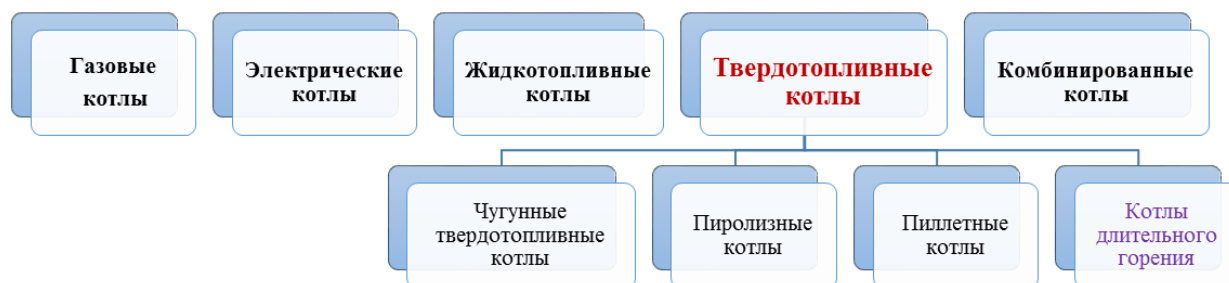


Рис. 6. Классификация отопительных котлов по виду потребляемого топлива.

Рассмотрим кратко данные виды котлов.

Газовые котлы отопления – самые распространённые и популярные. Просты в эксплуатации, долговечны, эффективны для обогрева больших помещений, при высоком КПД у газовых котлов низкая стоимость топлива (газа). Это наиболее распространённый вид котлов. Недостатки газовых котлов: они более опасны в эксплуатации в сравнении с другими видами, их обязательно оборудуют автоматикой, и для их установки обязательно утверждение проектной документации к котлу соответствующими службами [5, 7, 8].

Электрические котлы просты в монтаже и эксплуатации, обладают высоким КПД, компактны, бесшумны, экологичны (без вредных выбросов), и имеют высокую степень безопасности. Их недостатки – они имеют большое энергопотребление, требуют отдельную проводку (при мощности котла более 6 кВт для установки котла нужна трехфазная сеть электропроводки с напряжением 380 В) и не работают при перебоях электропитания [6, 7, 8].

Жидкотопливные котлы предназначены для автономных систем отопления. Они работают на дизельном

топливе (солярке), это наиболее дорогой вид отопления. Его преимущества – высокий КПД (до 94%), автоматизация процесса отопления, бесшумность работы [9, 10].

Главные преимущества комбинированных котлов (двух-, трехтопливных) – работа на разных видах топлива. К их недостаткам относят высокую стоимость, крупные габариты, необходимость подвода электричества. КПД комбинированных котлов ниже на 10-20% в сравнении с другими моделями [11].

Котлы на твердом топливе имеют ряд преимуществ, по сравнению с остальными видами котлов. К ним относятся: доступность, автономность и дешевизна топлива. Благодаря именно этим достоинствам твердотопливные котлы пользуются популярностью в районах, где имеются трудности с поставками электричества или газа. Ассортимент твердотопливных котлов очень высок, а топливо для них (например, каменный уголь) при относительно невысокой стоимости дает огромный тепловой эффект.

Основные технические характеристики разных типов котлов, их преимущества и недостатки представлены в таблице 1.

Теплові двигуни

Таблица 1.

Показатели	Газовые котлы	Электрические котлы	Жидкотопливные котлы	Комбинированные котлы	Твердотопливные котлы
1	2	3	4	5	6
Модель, производитель	МАЯК-10Р, Маяк	Dakon Daline PTE 10, Dakon	Гелиос-10, Автодеталь	Uragan-10, Термокрафт	Донтерм КОТ- 10Т, Донтерм
Топливо	Природный газ	Электроэнергия	Отработка масла, мазут	Твердое топливо, электроэнергия	Дрова, щепа, опилки, пеллеты, брикеты, кора, каменный уголь, кокс, торф, горючие сланцы
КПД, %	90	99	88-92	85	90
Мощность, кВт	10	10	10	10	10
Температура на выходе, °С	90	90	80	95	95
Расход топлива,	1,12 м ³ /ч	10,1 кВт/ч	0,86	1,2 кг/ч, 10,3 кВт/ч	1.2 кг/час
Отапливаемая площадь, м ²	100	120	120	100	100
Преимущества	Экономичность. Простота в использовании. Высокий КПД при малом расходе газа.	Безопасность. Легкость. Простота в использовании. Бесшумность. Отсутствие копоти.	Высокий КПД. Способность отапливать большие помещения.	Возможность использования разных видов топлива.	Наиболее экологически чистые. Недорогое топливо. Автономность.
Недостатки	Необходимость автоматики, проектной документации и газовой магистрали.	Большое энергопотребление. Необходимость дополнительной проводки. Зависимость от электропитания.	Необходимость большой емкости для топлива и отдельного помещения. Копоть.	Сложность и дороговизна в эксплуатации и ремонте.	Необходимость помещения для хранения топлива.

Рассматривая в работе твердотопливные котлы, были выделены следующие виды. Первый и самый распространенный вид – чугунные твердотопливные котлы предназначенные для сжигания угля и дров. Да эти котлы демонстрируют достаточно удобный цикл работы, энергонезависимы. Но основным видом топлива для них всё же является – уголь. Дрова в них горят достаточно быстро – не более 3-4 часов, что в свою очередь вызывает некоторый дискомфорт. Классический пример такого котла - это отечественный КЧМ, а зарубежный – серия Solida, от производителя Sime [12, 13].

Второй вид – пиролизные котлы – отличительная особенность - наличие двух камер сгорания: в первой происходит первичное горение (в этой камере искусственно создается дефицит кислорода, что приводит к процессу пиролиза и генерации синтез газа), во второй камере происходит догорание синтез газа. Основным видом топлива для данного вида котлов выступает древесина, желательно твердых пород. Время горения такого котла на одной закладке – от 6 до 10 часов. КПД при этом достигает уровня не менее 90%. Пример такого котла – Чешский Dakon серии KP Pyro [14].

Третий вид – пиллетные котлы. В этих котлах в качестве топлива используется прессованная и гранулированная древесина – пиллеты. Котел самостоятельно с помощью шнека подсыпает в зону горения необходимое количество топлива. Розжиг этого вида котлов также автоматический. Время горения котла зависит исключительно от емкости бункера. В отдельных случаях такие котлы комплектуются пневмоподачей топлива из хранилища. Для таких котлов топливо завозится один раз в сезон, далее весь процесс автоматизирован. Единственным недостатком данного вида котлов – это невозможность сжигать что либо кроме древесных гранул [15].

Следующий вид – это котлы длительного горения. В данном подвиде котлов используются преимущественно дрова и опилки – но возможны варианты с углем и смесями угля, торфа и дров. Время горения данного вида котла составляет от 12

часов до двух суток и это на дереве. Недостатки этих котлов - это необходимость помещения для хранения твердого топлива и ручная загрузка топлива [16].

Котлы длительного горения не нуждаются в накопителях тепла – время горения позволяет обходиться без них.

Твердотопливные котлы длительного горения целесообразно использовать для отопления удаленных помещений небольшой площади локомотивных и вагонных депо; бригадных домов и домов отдыха локомотивных бригад; пункты контроля железнодорожных поездов автотранспортом; железнодорожные станции и узлы.

Выводы.

1. Сделанный анализ расходов на нужды котельни по Укрзализныци за 1997-2014 гг. показал целесообразность использования твердого топлива, преимущественно дрова.

2. Перспективы использования твердотопливных котлов: бригадные дома локомотивных бригад; пункты контроля железнодорожных поездов автотранспортом, станции, удаленные помещения предприятий железнодорожного транспорта.

3. На основании существующей литературы экспертным методом определены основные характеристики котлов. К ним отнесены: вид топлива; номинальная мощность; основные функции котла; степень автоматизации котельного оборудования; вес и габариты котла.

4. По виду потребляемого топлива сделана классификация отопительных котлов: газовые, электрические, комбинированные и твердотопливные котлы. Были наведены их краткие характеристики.

5. Для улучшения технических характеристик необходимо в будущем усовершенствовать конструкцию котла, параметры топки, рассчитать оптимальные размеры котла.

Список використаних джерел

1. http://bookz.ru/authors/sbornik-statei/bitovie-_669/1-bitovie-_669.html.
2. В.А. Григорьев Промышленная теплоэнергетика и теплотехника [Текст] / В.А. Григорьев, В.М. Зорин – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 552 с.
3. В.А. Маляренко Енергозбереження в житлово-комунальному господарстві. Частина I. [Текст] / В.А. Маляренко, Л.М. Шутенко -Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2005 №7 – 2-9 с.
4. В.Н. Пуль Автономное теплоснабжение [Текст] / В.Н. Пуль - Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2006 №1 – 37-38 с.
5. www.otopimdom.ru/index.php?id=35.
6. И. С. Жигулина Особенности применения электрического отопления [Текст] / И. С. Жигулина, А. И. Алифанова - Современные наукоемкие технологии. Журнал № 8-1 / 2013 – 41-42 с.
7. С.Г. Каспаров Реконструкция системы отопления нефтебазы «Харьковская» [Текст] / С.Г. Каспаров, Н.В. Кирилин -Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2007 №3 – 101-111 с.
8. А. Н. Сканава Отопление. [Текст] / А. Н. Сканава Учебник для вузов. — М.: АСВ, 2008. С. 576. ISBN 978-5-93093-161-7.
9. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4,0 МВт, ОКС 27.060.30, 97.100, ОКП 49 3120, Дата введения 2003–01–01.
10. http://www.kotloved.ru/santehnik2002_2.html.
11. http://stroy-aqua.com/vodosnab_otopl/kotel/kombinirovannye-kotly-otopleniya.html.
12. http://sime.com.ua/ru/napolnye_tverdoplivnyye_kotly/kotel-sime-solida.html.
13. <http://www.termoles.ru/kotly-kchm.html?showall=&start=2>.
14. <http://www.dakon.in.ua/produksiya/tverdoplivnyye-kotly/piroliznyye-stalnye-kp-pyro>.
15. http://b2b-ua.com/invent-pelletnie_kotli.html.
16. <http://pelletshome.com.ua/ru/14-kotli-dlitelnogo-goreniya>.
17. <http://www.uipv.org/ua/bases2.html/>

Фалендыш Анатолий Петрович, д.т.н., заведующий кафедры теплотехники и тепловых двигателей Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина, Тел. (057)-730-10-77. E-mail: fap_hiit@rambler.ru.

Пархоменко Лариса Алексеевна, к.т.н., старший преподаватель кафедры теплотехники и тепловых двигателей Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина, Тел. (057)-730-10-78.

Клецкая Ольга Витальевна, аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина, Тел. (057)-730-10-78. E-mail: gurao@yandex.ru.

Рукавишников Павел Владимирович, старший преподаватель кафедры теплотехники и тепловых двигателей Украинского государственного университета железнодорожного транспорта, г. Харьков, Украина, Тел. (057)-730-10-78. E-mail: pasha0776@mail.ru.

Falendysh Anatoliy d-r science, professor department of operation and maintenance of rolling stock Ukraine State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-21-25. E-mail: fap_hiit@rambler.ru.

Parkhomenko Larisa, Senior Lecturer, Department of Thermal Engineering and Heat Engines Ukrainian State University of railway competition, Kharkov, Ukraine, Tel. (057) -730-10-78.

Kletska Olga aspirant the Department of Thermal Engineering and Heat Engines Ukraine State University of Railway Transport Tel.: (057) 730-10-78. E-mail: gurao@yandex.ru.

Rukavishnikov Pavel, Senior Lecturer, Department of Thermal Engineering and Heat Engines Ukrainian State University of railway competition, Kharkov, Ukraine, Tel. (057) -730-10-78. E-mail: pasha0776@mail.ru.

Стаття поступила 21.04.2015

УДК (629.424.24 - 629.424.27)

СКЛАДЕНІСТЬ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДІВ ПРИМІСЬКОГО СПОЛУЧЕННЯ

С. Г. Жалкін, канд. техн. наук, проф., О. Д. Жалкін, магістр

СОСТАВНОСТЬ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДОВ ПРИГОРОДНОГО СООБЩЕНИЯ

С. Г. Жалкин, канд. техн. наук, проф., А. Д. Жалкин, магистр

**THE NUMBER OF DIESEL-TRAIN CARS THAT
USED IN SUBURBAN TRAFFIC**

S. G. Zhalkin, Ph.D., prof., O. D. Zhalkin, master's degree

На неелектрифікованих ділянках залізниць України експлуатуються дизель-поїзди Угорського виробництва, Ризького вагонобудівного заводу (Латвія), ХК «Лугансктепловоз». З метою порівняння ефективності їх застосування виконано аналіз показників роботи дизель-поїздів з різною передачею потужності, різними силовими установками, різної складеності поїздів. Кращі показники у приміському та місцевому сполученні мають дизель-поїзди з гідروпередачею потужності зі складеністю за формулою $M + 4П + M$.

Ключові слова: дизель-поїзд, гідропередача, складеність, дизель, паливо, швидкість, прискорення, пасажирообіг, пасажиромісткість, прискорення, колія.

На неелектрифіцированных участках железных дорог Украины эксплуатируются дизель-поезда Венгерского производства, Рижского вагоностроительного завода (Латвия), ХК «Лугансктепловоз». С целью сравнения эффективности их применения выполнен анализ показателей работы дизель-поездов с разной передачей мощности, различными силовыми установками, различной составности поездов. Лучшие показатели в пригородном и местном сообщении имеют дизель-поезда с гидротрансмиссией мощности составностью по формуле $M + 4П + M$.

Ключевые слова: дизель-поезд, гидротрансмиссия, составность, дизель, топливо, скорость, пассажирооборот, пассажироместимость, ускорение, путь.

In article information about diesel-trains. On non-electrified sections of Ukrainian railways are operated such series of diesel trains:

- D1 formula of train (M (motor wagon) + $2T$ (trailer wagon) + M) that has been built in Hungary with hydro-mechanical transmission;

- DR1A formula of train ($M + 4T + M$) that has been built in Latvia with hydraulic transmission;

- DPL1 formula of train (DL (diesel locomotive) + $3T + Tcc$ (trailer wagon with control cabin) that has been built in Ukraine with a freight locomotive;

- DPL2 formula of train ($DL + 4T$) also with a freight locomotive;

- DEL01, DEL02 ($2M + 1$ or $2 T$) that has been built in Ukraine with electrical transmission).

With aim to determine the effectiveness, in article was made the analysis of indicators of diesel-trains work with different transmissions and different formulas. Analysis showed, that the best indicators of diesel trains work has diesel-trains with hydraulic transmission with formula ($M + 4T + M$) with ability to change number of trailer wagons to ($M + 2T + M$) or ($M + T + M$).

Although diesel-trains should has the ability to work in pairs with such formulas $(M + T + M) + (M + T + M)$ or $(M + 2T + M) + (M + 2T + M)$ depending to the conditions of using.

Keywords: diesel-train, hydraulic transmission, number of cars, diesel, fuel, speed, acceleration, passenger traffic, passenger capacity, acceleration, path.

Вступ.

Провідну роль у забезпеченні потреб виробничої сфери і населення України в перевезеннях відіграє залізничний транспорт. На сьогодні його частка у вантажообігу країни становить понад 80% (без урахування трубопровідного транспорту) та пасажирообігу близько 50%, який здійснюється всіма видами транспорту. Традиційними перевагами залізничного транспорту є його економічність, безпечність, доступність та екологічність.

Пасажирські перевезення, у тому числі у приміському сполученні, завжди були збитковими та дотувалися за рахунок вантажних перевезень. Це викликано специфікою таких перевезень, до якої відносяться простої локомотивного та моторвагонного рухомого складу (МВРС) в пунктах оборту у очікуванні зворотнього рейсу, сезонні коливання пасажиропотоку, зношеність рухомого складу та експлуатація зверх нормативного терміну, не повна компенсація за перевезення пільгових категорій громадян, та інше. Тому підвищення економічної ефективності пасажирських перевезень є актуальною задачею.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.

Програмою реформування залізничного транспорту України передбачено відокремлення пасажирських перевезень – в першу чергу приміських та місцевих – від вантажних перевезень з подальшою передачею цих перевезень приватним компаніям, [1]. У теперішні часи створено Головне управління приміських перевезень, а в складі залізниць служби приміських перевезень. Для усунення збитковості потрібно розробити вимоги до нового МВРС в частині застосування сучасних економічних силових установок, розробки нового рухомого складу з гнучкою системою переформування кількості вагонів в залежності від розміру пасажиропотоку,

що ліквідує порожні пробіги дизель-поїздів, визначитися з типом передачі потужності, створення гібридних силових установок та інше, [2,3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дизель-поїзди набули широкого застосування в обслуговуванні пасажирських перевезень на залізницях багатьох країн світу. У більшій мірі вони використовуються в приміському (на відстані до 150 км) або місцевому сполученні (відстань від 150 до 700 км) на неелектрифікованих залізничних ділянках, [2,4]. Можливість їхнього використання, як на другорядних лініях з невеликим пасажиропотоком, так і на головних напрямках з інтенсивними перевезеннями пасажирів на більш далекі відстані привела до того, що по конструктивному виконанню й експлуатаційним характеристикам дизель-поїзди відрізняються великою різноманітністю. Поряд з дизель-поїздами невеликої потужності з одним або двома причіпними вагонами позитивно зарекомендували себе в міжнародних транс'європейських пасажирських перевезеннях багатовагонні дизель-поїзди із силовими установками, сумарна потужність яких досягає 1500 кВт, [5].

В якості силових установок в дизель-поїздах, як правило, використовуються чотиритактні швидкохідні дизелі, які можуть розташовуватися в кузові, під вагоном і на візку. В якості передач потужності на дизель-поїздах використовуються всі відомі різновиди передач. Найбільш широко використовується на дизель-поїздах гідравлічна передача. Однак гідروпередачі уступають електричним передачам з асинхронним приводом по ряду показників. У зв'язку із цим останнім часом частина виробників при конструюванні дизель-поїздів віддають перевагу електропередачам.

Набирає розвиток тенденція створення дизель-поїздів з комбінованим тяговим приводом (гібридним). Наприклад,

поїзд Lixeh оснащений двома гіроскопічними акумуляторами енергії, що заряджаються за рахунок енергії гальмування. Накопичену енергію можна використати при пуску й розгоні поїзда, а також для живлення різного бортового устаткування. Залежно від очікуваного пасажиропотоку поїзд може бути 3 вагонним, 6, 9 або 12 вагонним при зчіплюванні модулів, [6]. В літературі відсутні дані по економічній ефективності роботи дизель-поїздів різної складеності, з різними типами передачі потужності, різними силовими установками, а виробники дизель-поїздів публікують інформацію тільки про технічні показники, які передбачені конструкцією.

Визначення мети та задачі дослідження.

МВРС залізниць України характеризується великою кількістю конструкцій дизель-поїздів – різна складеність (від 3 до 8 вагонів), різні передачі потужності (гідралічна, електрична, локомотивна тяга), різні двигуни різної потужності, різна конструкція вагонів та візків та інше. Такий стан значно збільшує витрати на ремонт, виготовлення запасних частин, виготовлення технологічного обладнання для ремонту, підготовку ремонтного й експлуатаційного персоналу, [2,7].

Метою цього дослідження є розробка пропозицій по зменшенню витрат в експлуатації, удосконаленню конструкції нових дизель-поїздів, модернізації діючих.

Задачею дослідження є збір та аналіз показників експлуатації, обґрунтування пропонуємих пропозицій по підвищенню ефективності роботи дизель-поїздів.

Основна частина дослідження.

Особливостями приміських перевезень, що впливають на організацію руху приміських поїздів, є:

- концентрація перевезень у великих центрах (містах);
- масовість перевезень зі значною кількістю поїздок на одного пасажирів на рік;
- перевезення здійснюються на короткі відстані;
- різке падіння пасажиропотоку на дільниці при віддаленні від головної станції;

- нерівномірність перевезень по сезонах року, дням тижня та по годинам доби, наявність міжсезонної кореспонденції пасажиропотоків.

Графік руху приміських поїздів на залізниці розробляється з урахуванням зручного за часом підвозу робітників на підприємства до початку роботи та своєчасного вивозу їх до місця проживання після закінчення роботи, а також задоволення потреби населення у під'їзді до поїздів місцевого та дальнього сполучення в пунктах пересадки. Доцільність курсування приміських поїздів визначається від наявності пасажиропотоку, фактичних надходжень від продажу проїзних документів і компенсацій від місцевих органів виконавчої влади за перевезення пільгових категорій громадян, [12].

На неелектрифікованих дільницях залізниць України, протяжність яких майже 12 тис. км, експлуатуються дизель-поїзди Д1 Угорського виробництва, Ризького вагонобудівного заводу (Латвія) ДР1А (44,5% та 39,1 % від загальної кількості відповідно) з гідралічною передачею потужності та виробництва ХК «Луганськтепловоз» (біля 16%) ДТЛ1, ДТЛ2, ДПЛ1 і ДПЛ2 з локомотивною тягою (вантажні тепловози 2ТЕ116, 2М62, М62). Результати розрахунків та експлуатація таких дизель-поїздів показали, що використання магістральних тепловозів з їх характеристиками та масою для потягів приміського сполучення недоцільне, [2,7].

Для приміського сполучення були виготовлені дизель-поїзди ДЕЛ01 з застосуванням дизель-агрегата 588ДА вітчизняного виробництва (завод ім. Малишева, м. Харків) та ДЕЛ02 з силовим модулем 12V183DE фірми MTU (Німеччина). Обидва дизель-поїзди мають електричну передачу потужності змінно-постійно-змінного струму з асинхронними тяговими двигунами, конструкційну швидкість 130 км/год., прискорення 0,4 м/сек². Застосовані уніфіковані вагони приміського сполучення серії 1003 в габариті Т у тридверному виконанні кузова вагонів, [2,8].

У приміському та місцевому сполученні застосовуються також

Рухомий склад залізниць

пасажирські тепловози ТЕП70 та не пристосовані для пасажирських перевезень маневрові тепловози ЧМЕЗ, вантажні М62, електровози ВЛ80 з причіпними вагонами загального або плацкартного типу. Економічна ефективність таких поїздів українська низька. Досвід експлуатації показує, що чотирьохвагонний дизель-поїзд, наприклад, із двох автоматрис АЧ2 й двох причіпних вагонів, у порівнянні з поїздом із чотирьох вагонів й односекційного тепловоза, витрачає палива на 1 пасажиро-кілометр у 1,9-2 рази менше. Експлуатується невелика кількість рейкових автобусів 620М, 630М виробництва фірми «PESA Bydgoszcz» (Польща) та РА2 Митіщинського заводу «Метровагонмаш» (РФ).

Виконаний аналіз застосування дизель-поїздів у країнах світу та різних виробників показав, що на даний момент простежується тенденція прискореного переходу перевезень у приміських сполученнях з локомотивної тяги на більш легкий і економічний моторвагонний рухомий склад (електро- та дизель-поїзди). Відстань між зупинками у приміському сполученні складає у різних країнах від 3 до 40 км, відрізняються також тягові плечі – від 19 км до 300 км, [2].

Гідропередачі – компактні, надійні, довговічні, прості в експлуатації, [9,10]. Однак переваги гідравлічної передачі які наведені у літературі, у порівнянні з електричною, належать до того періоду, коли

застосовувалися колісно-моторні тягові двигуни, що мають відомі недоліки в порівнянні з асинхронними двигунами [8,11]. Щоб дати об'єктивну оцінку переваг і недоліків той чи іншої передачі потужності треба виконувати аналіз характеристик цих передач, вартість їх виготовлення та витрати на утримання, вплив на колію, одержання максимального прискорення при розгоні, термін окупності та інше. У більшості країн світу спостерігається чітка картина з використання передач: механічні при потужності менш 220 кВт, гідравлічні звичайно при потужностях до 750 кВт, електричні передачі при великих потужностях.

Для аналізу параметрів дизель-поїзда та оцінки його технічного рівня застосовують такі техніко-економічні показники: питома витрата палива, ресурс та потужність силової установки (дизеля), вага (навантаження на вісь), сила тяги тривалого режиму, конструкційна швидкість, прискорення на початку руху та уповільнення при гальмуванні, кількість пасажирів та кількість місць для сидіння, загальна кількість місць (коефіцієнт місткості), кількість пасажирів, яка приходить на одні входні двері, склад дизель-поїзда. Вибір показників можливо здійснювати за методиками які базуються на теорії множин (на теорії бінарних відношень), [12]. Згідно з цією теорією дизель-поїзди (ДП) можливо охарактеризувати номенклатурою показників

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \quad (1)$$

де X – номенклатура параметрів ДП;
 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – n -ий параметр ДП.

Вибір номенклатури технічних показників виконується за критерієм

корисного економічного ефекту від використання ДП,

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta E_{\text{експл.вит}} + \Delta E_{\text{вик.роб}} + \Delta E_{\text{вик.ремонт}}, \quad (2)$$

де ΔE_{Σ} – сумарний економічний ефект від використання ДП;

$\Delta E_{\text{експ.вит}}$ – економічний ефект, який отримується від зменшення експлуатаційних витрат;

Рухомий склад залізниць

$\Delta E_{\text{вик.роб}}$ - економічний ефект, який отримується від збільшення обсягів роботи;

$\Delta E_{\text{вит.ремонт}}$ - економічний ефект, який отримується від зменшення витрат на обслуговування та ремонт.

Аналіз ефективності та умов роботи дизель-поїздів виконуємо стосовно таких, які

працюють на залізницях України у приміському русі – Д1 та ДР1А з гідروпередачею, ДПЛ1 з локомотивною тягою та ДЕЛ02 з електропередачею змінного струму. Основні параметри дизель-поїздів наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні параметри дизель-поїздів Д1, ДР1А, ДПЛ1, ДЕЛ02.

Параметри	Дизель-поїзди			
	Д1	ДР1А	ДПЛ1	ДЕЛ02
1	2	3	4	5
Складеність, вагон (секція)	М+2П+М	М+4П+М	Т+3П+Пку	М+П+М
Потужність СУ, кВт	2 x 536	2 x 735	1470	2 x 550
Конструкційна швидкість, км/год	120	120	100	130
Максимальна швидкість на перегоні, км/год	82,7	86,9	87,1	82,6
Прискорення руху при русенні з місця, м/с ²	0,4	0,42	0,43	0,40
Маса поїзда, т	237	346	411	232
Навантаження на вісь, яка рухає, тс:				
- моторного вагону;	17,0	18,5	19,8	20,4
- причіпного вагону.	8,7	9,4	11,5	11,5
Кількість місць для сидіння	400	648	508	340
Максимальна пасажиромісткість, осіб	704	1143	1020	890
Питома маса на одне місце, кг/місце	512,50	416,66	584,64	511,76
Кількість пасажирів на одні вхідні двері, осіб	64	64	45	45
Питомі витрати потужності, кВт/т	5,17	4,24	3,57	4,74
Габарит вагонів	1Т	1Т	Т	Т

З таблиці 1 видно, що за складеністю дизель-поїзди залізниць України значно відрізняються – від 3-х вагонів у Д1, ДЕЛ02, чотирьох у ДПЛ1 до шести у ДР1А. Потужність СУ також значно відрізняється: дизель-поїзди Д1 та ДЕЛ02 мають майже однакову потужність, дизель-поїзд ДПЛ1 значно більшу (1470 кВт) в порівнянні з іншими. Конструкційна швидкість відрізняється не значно, а максимальна

швидкість на перегоні однакова у Д1 та ДЕЛ02 й ДР1А та ДПЛ1 при значній різниці у складеності. Це відноситься також до маси поїзда – найбільш важкий дизель-поїзд ДПЛ1 у 411 тон має максимальну пасажиромісткість у 1020 осіб. Шестивагонний ДР1А має масу 346 тон та максимальну пасажиромісткість у 1143 особи, тобто найбільшу кількість пасажирів на 1 вагон (190 осіб).

Рухомий склад залізниць

Дизель-поїзди Д1 та ДЕЛ02 при майже однаковій максимальній масі мають різницю пасажиромісткості майже у 190 осіб. Поїзд ДР1А при найбільшій довжині має найменшу масу на одне місце – 416,66 кг, тобто поїзди з гідропередачею мають перевагу по масагабаритним показникам та пасажиромісткості. Питомі витрати потужності дизель-поїздів з гідропередачею Д1 та ДР1А (відповідно 4,52 й 4,24 кВт/т) менші в порівнянні з поїздом ДЕЛ02 (4,74 кВт/т) з електропередачею. Уніфіковані вагони приміського сполучення серії 1003 дизель-поїздів ДПЛ1 та ДЕЛ02, що виконані у габариті Т з тридверним кузовом, дозволяють скоротити час посадки і висадки пасажирів, зменшити кількість пасажирів на одні вихідні двері з 64 до 45 осіб відповідно у дизель-поїздах ДР1А та ДЕЛ02, що підвищує комфортність умов перевезення пасажирів.

Як показує аналіз прискорення у всіх розглянутих у таблиці 1.1 дизель-поїздів прискорення фактично однакове й не залежить від типу передачі потужності.

Навантаження на рейки колії від колісних пар, що рухають на дизель-поїздах з гідравлічною передачею потужності значно нижче в порівнянні з електричною передачею як з асинхронним, так і локомотивним приводом. Таким чином, дизель-поїзди з гідравлічною передачею можуть експлуатуватися на колії з легкою верхньою будовою, що характерно для міського та приміського руху дизель-поїздів. Двохвісні візки дизель-поїздів Д1 та ДР1А дозволяють їм вписуватися у криві колії з мінімальним радіусом у 100 метрів при швидкості у 5 км/год, у той же час як тривісним візкам дизель-поїздів ДПЛ1 потрібні мінімальні радіуси кривих у 125м.

Питомі витрати палива на тягу дизель-поїздів на різних залізницях значно відрізняються навіть у поїздів однієї серії. Це пов'язано зі станом, в основному силових установок, терміном служби та умовами експлуатації, показниками роботи дизельних двигунів. Середня витрата палива за 2 роки по залізницям наведена у таблиці 2.

Таблиця 2 – Середня витрата палива дизель-поїздами по залізницям України

Залізниця	Питома витрата палива ДП, кг/10 ⁴ ткм брутто			
	Д1	ДР1А	ДПЛ1	ДЕЛ02
1	2	3	4	5
Південна	-	83,15	-	-
Львівська	107,35	93,80	107,25	131,15

Продовження таблиці 2.

1	2	3	4	5
Одеська	113,25	-	-	108,36
Південно - Західна	-	70,87	-	-
Донецька	107,87	-	-	-
Середня по Укрзалізниці	109,50	82,60	107,25	119,76

Якщо витрата палива дизель-поїздами Д1 на Львівській та Одеській залізницях відрізняються в межах 9,4%, то на новій серії дизель-поїздів типу ДЕЛ02 з передачею змінного струму та асинхронним приводом різниця у витратах палива значна – 131,15 та 108,36 кг/10⁴ ткм брутто відповідно. Це можливо частково пояснити різними умовами експлуатації – на Львівській залізниці дизель-поїзди експлуатуються на ділянках колії, що розташовані у горах.

Найменшу питому витрату палива мають дизель-поїзди серії ДР1А (не дивлячись на позанормативний пробіг від побудови), яка на Південно-Західній залізниці складає 70,87 кг/10⁴ ткм брутто, а найбільша витрата у ДП серії ДЕЛ02 з електричною передачею потужності - 131,15 кг/10⁴ ткм брутто (різниця у 54%). Дизель-поїзди ДПЛ1 з тепловозною тягою (тепловоз М62) мають питому витрату палива однакову в порівнянні з поїздами Д1 на

одній й той же Львівській залізниці. У той же час тепловози М62, які використовуються в міжрегіональному сполученні з пасажирськими поїздами на цій же залізниці, мають витрату палива на $9,5 \text{ кг}/10^4 \text{ ткм}$ бруто меншу (або на 9,1%), що вказує на недоцільність застосування вантажних тепловозів у приміському сполученні. Менші витрати палива дизель-поїздів Д1 та ДР1А пояснюються також тим, що опалення пасажирських салонів виконується теплотою охолоджуючої рідини дизеля та теплоти від гідропередачі (у зимовий період доповнюється казаном).

Огляд нормативних документів, програм, літературних джерел показує, що відсутня програма модернізації дизель-поїздів по заміні неекономічних, застарілих силових установок на сучасні, застосування науково обґрунтованих пропозицій по зменшенню витрат палива у сезонні періоди експлуатації, [13] створення гібридних силових установок [14, 15, 16].

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.

1. Дизель-поїзди набули широкого застосування в обслуговуванні пасажирських перевезень на залізницях багатьох країн світу в приміському й місцевому сполученнях на неелектрифікованих залізничних ділянках як на другорядних лініях з невеликим пасажиропотоком, так і на головних напрямках (регіональні та міжрегіональні перевезення).

2. Промисловістю України за роки незалежності розроблено і побудовано декілька типів дизель-поїздів різної конструкції. Застосування дизель-поїздів з локомотивною тягою показало їх економічну недоцільність у приміських перевезеннях пасажирів.

3. В якості передач потужності на дизель-поїздах використовуються всі відомі різновиди передач потужності. Найбільш широко використовується гідравлічна передача потужності (74% від загальної чисельності дизель-поїздів України). Але з розвитком електропередач змінного струму з асинхронним приводом такі передачі по техніко-економічним показникам наближаються до показників гідропередач.

4. Аналіз експлуатації дизель-поїздів показав, що кращі показники у приміському, місцевому сполученні мають дизель-поїзди з гідропередачею потужності зі складеністю $M + 4П + M$ з гнучкою схемою зміни кількості причіпних вагонів, наприклад: $M + 2П + M$, $M + П + M$. Повинна бути передбачена експлуатація зчеплених поїздів (система багатьох одиниць), наприклад: $(M + П + M) + (M + П + M)$, $(M + 2П + M) + (M + 2П + M)$ в залежності від потреб оператора перевезень пасажирів.

5. Для підтримки дизель-поїздів у роботоспроможному стані необхідно активізувати капітальні ремонти з подовженням терміну експлуатації (КРП) та комплексну модернізацію з заміною застарілих та зношених силових установок новими, такими як Power Pack з двигунами фірми MTU (Німеччина) та гідропередачею Voith, які експлуатуються у багатьох країнах світу, у тому числі на залізницях України. Але у подальшій перспективі потрібно визначитись з типами дизель-поїздів, які можливо виробляти в Україні або придбати за кордоном.

6. З метою зменшення витрат палива та оливи при комплексній модернізації необхідно застосовувати наукові досягнення в галузі покращення роботи двигунів дизель-поїздів на холостому ході та неусталених режимах (гібридні СУ), енергозбереження систем дизеля та гідропередачі у періоди сезонної експлуатації, подовження термінів придатності робочих рідин (оливи) дизеля та гідропередачі.

Перспектива подальших досліджень полягає у тому, щоб розробити схему гібридної силової установки дизель-поїзда з гідравлічною передачею потужності з застосуванням гідроакумулятора, що дасть змогу усунути неусталені процеси, зменшити витрату палива й викиди шкідливих речовин при роботі дизеля на холостому ході, зрушенні з місця та розгоні після стоянки.

Список використаних джерел

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, [Текст] затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 16.12.2009 №1390.
2. Басов Г.Г. Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України [Текст] / Г.Г. Басов. – Харків: Алекс+, 2004. -240с.
3. Яновський П.О., Христофор О.В. Перспективні напрями удосконалення системи приміських пасажирських перевезень. [Текст] Журнал «Локомотив-інформ» №11-12, 2009 изд. Рухомий склад С. 12-16, м. Харків ISSN1994-2338.
4. Дизельный моторвагонный подвижной состав для железных дорог Европы [Текст] //Железные дороги мира. - 1999. - №7. - С.21-25.
5. В.И. Карянин. Компания Stadler на Экспо 1520. [Текст] Журнал «Локомотив», №11, 2013г., 38-40с.
6. Дизель-поезд Lirex [Текст] // Железные дороги мира. — 2001. — №2. — С.27-34.
7. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976-1985 г.) [Текст] М: Транспорт, 1990. – 238с.
8. Басов Г.Г., Носеев В.І. Електропередача дизель-поїзда ДЕЛ-01 [Текст] / Вісн. СНУ. - Луганськ: - 2000. - №5(27). - С. 64-68.
9. Дизель-поезда: Устройство, ремонт, эксплуатация. [Текст] / Б.М. Лернер, Н.П. Ковалев, В.Л. Лебедев и др. М.: Транспорт, 1982, 279с.
10. Шаройко, П.М. Гидравлические передачи тепловозов: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта [Текст] / П.М. Шаройко, В.Т. Серода. – М.: Транспорт, 1969. – 160 с.
11. Исаев И.П. Асинхронный привод электропоездов. [Текст] Железнодорожный транспорт. - 1987. -№1. - С.43-45.
12. Александров П.С. Введение в общую теорию множеств и функций. [Текст] - М.: Гостехиздат, 1948. - 211 с.
13. Пат. №107584 Україна. Стационарна установка для прогрівання систем тепловозів та дизель-поїздів [Текст] / Жалкін С.Г., Жалкін Д.С., Жалкін О.Д. / № a201211230, опубл. 26.01.13, Бюл.№2. - 8 с.
14. Бажинов, О.В. Гібридні автомобілі [Текст] / О.В. Бажинов, О.П. Смірнов, С.А. Серіков, А.В. Гнатов, А.В. Колесніков. – Харків: Крок, 2008. – 327 с.
15. Пат. на корисну модель №98807. Гібридна силова установка рейкового транспорту [Текст] / Жалкін О.Д., Тартаковський Е.Д., Жалкін С.Г., Жалкін Д.С. та інші / № u201411899, опубл. 12.05.2015, Бюл. №9. – 8с.
16. Звіт про науково-дослідну роботу «Зниження витрат палива та шкідливих викидів енергетичними установками під час експлуатації дизель-поїздів» [Текст] / Жалкін Д.С., Жалкін О.Д., Жалкін С.Г., Фалендиш А.П. та інші / УкрДАЗТ, опубл. 11. 03.2015, № держреєстрації 0114U000086, – 98с.

Жалкін Сергій Григорович канд. техн. наук, професор кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-16. E-mail: abddd@mail.ru
Zhalkin Sergii Grigorovich Ph.D., professor of cathedra maintenance and repair of rolling stock Ukraine State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-16. E-mail: abddd@mail.ru

Жалкін Олексій Денисович магістр, асистент кафедри експлуатація та ремонт рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (093) 545-53-59. E-mail: amp123@mail.ru

Zhalkin Oleksii Denusovich master's degree, assistant of cathedra maintenance and repair of rolling stock Ukraine State University of Railway Transport. Tel. (093) 545-53-59. E-mail: amp123@mail.ru

Стаття поступила 21.04.2015

СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ЛОКОМОТИВНИХ БРИГАД

Д.т.н. О. Б. Бабанін, д.т.н Д. В. Ломотько, к. т. н. О. М. Горобченко

СИНТЕЗ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОЗБЕРЕГАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

Д.т.н. А. Б. Бабанин, д.т.н Д. В. Ломотько, к. т. н. А. Н. Горобченко

SYNTHESIS OF STRUCTURE OF ENERGY-SAVING DECISION SUPPORT SYSTEM FOR LOCOMOTIVE CREWS.

Doct. of techn. sciences A. B. Babanin, doct. of techn. sciences D. V. Lomotko, PhD A. N. Gorobchenko

Розглянуто питання створення енергозберігаючої структури системи підтримки прийняття рішень. В результаті аналізу існуючих типів інтелектуальних систем, їх ієрархій та алгоритмів, враховуючи умови роботи локомотивних бригад та залізничного транспорту в цілому, розроблені параметри проектної системи. Особливістю її є можливість оцінки безпеки руху при виробленні рішень.

Ключові слова: локомотивна бригада, керування поїздом, інтелектуальна система, прийняття рішень.

Рассмотрены вопросы создания энергосберегающей структуры системы поддержки принятия решений. В результате анализа существующих типов интеллектуальных систем, их иерархий и алгоритмов, учитывая условия работы локомотивных бригад и железнодорожного транспорта в целом, разработаны параметры проектируемой интеллектуальной системы. Особенностью ее является возможность оценки безопасности движения при выработке решений.

Ключевые слова: локомотивная бригада, управление поездом, интеллектуальная система, принятие решений.

Defined characteristics of the DSS for locomotive crews. Synthesis structure DSS performed in three stages: determining the number of levels and units of the system, the distribution system functions through the levels, rationale for the use of technical means. A distinctive feature is the availability of its subsystems assess the complexity of emergency situations, predicting the quality of decisions, communicate with the server of the railway, the control environment. An analysis of existing types of intelligent systems and their hierarchies and algorithms, considering the conditions of work of locomotive crews and railway transport as a whole, the projected parameters developed intellectual system. It is determined that the system consists of two levels - level and the level of the railway locomotive. Skill distribution system functions through the levels and justified the choice of means. The purpose of the system is to develop management solutions locomotive that will ensure sustainable use of the rolling stock in the current train situation. A special feature is the ability to assess its safety when making decisions.

Keywords: locomotive crew, train control, intelligent system, decision making.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Ефективна та безпечна робота залізничного транспорту багато в чому залежить від вірності та оперативності рішень, що приймають працівники залізниць на різних рівнях. Розвиток сучасних інформаційних технологій, методології моделювання складних систем і вирішення завдань з управління транспортними процесами забезпечує можливість створення систем підтримки прийняття рішень (СППР) для локомотивних бригад щодо забезпечення безпеки руху при керуванні поїздом та підвищення ефективності використання локомотивів. Розробка цієї системи являє собою актуальну, досить складну проблему,

пов'язану з продукцією обґрунтованих рішень в умовах обмеження часу, неповної визначеності ряду факторів, у тому числі і переваг особи, що приймає рішення. Успішне вирішення даної проблеми може бути забезпечене тільки при ефективному поєднанні досвіду, знань, інтуїції та вміння людини приймати обґрунтовані рішення з сучасними математичними методами рішення завдань і імітаційним моделюванням розглянутих процесів.

Аналіз досліджень та публікацій.

Відомо, що головними проблемами, розв'язуваними при створенні таких систем, є зіставлення описів станів об'єкта прийняття рішень (об'єкта керування) з умовами істинності продукцій, а також визначення послідовності перегляду та аналізу продукцій при виводі рішень [1]. В роботі [2] запропоновано системний підхід до створення СППР та методологія, що базується на ідеї накопичення знань в комп'ютерній формі баз знань з подальшим їх використанням для прийняття рішень. Опис поточного стану об'єкта керування представляється у вигляді нечіткої ситуації [3]. Інтерактивна процедура прийняття рішення за допомогою СППР представляє собою циклічний процес взаємодії людини та комп'ютера. В ньому є такі елементи: аналіз і постановка завдання для комп'ютера та фаза пошуку рішення. СППР виконують наступні функції [4]:

1. Допмагають людині оцінити обстановку, обрати критерії та оцінити їх відносну важливість.
2. Генерують можливі сценарії дій.
3. Виконують оцінку сценаріїв, обираючи найкращий.
4. Забезпечують постійний обмін інформацією о процесі прийняття рішення і допомагають узгоджувати групові рішення.
5. Моделюють рішення, що приймаються.
6. Здійснюють динамічний комп'ютерний аналіз можливих наслідків рішень.
7. Виконують збирання даних при результати реалізації прийнятих рішень.
8. На основі аналізу результатів прийнятих рішень і оцінки їх ефективності виконують донавчання.

За характером розподіленості СППР можуть бути розподілені і сконцентровані. Сконцентровані (локальні) СППР включають в себе одну систему, встановлену на одній

ЕОМ, вони допомагають одній особі, що приймає рішення (ОПР) [5]. Просторово та функціонально розподілені СППР складаються з локальних СППР, розташованих в зв'язаних між собою вузлах обчислювальної мережі, кожен з яких може незалежно вирішувати свої завдання, але для вирішення загальної проблеми жодна з них не має достатніх знань, інформації та ресурсів. Загальну проблему вони можуть вирішувати тільки сукупно.

Постановка задачі. У нашому випадку постає завдання синтезу структури СППР для локомотивних бригад, щоб забезпечувала максимальну ефективність з точки зору енергозбереження та безпеки руху. Цю систему на першому етапі впровадження можна вважати локальною (встановленою на локомотиві для використання одним машиністом). Однак в подальшому, при достатньому розвитку бортових систем потрібно переходити до наступного етапу – створення розподіленої системи, що буде вміщувати бортові локомотивні СППР, засоби зв'язку, серверну частину, загальну базу знань.

Викладення основного матеріалу. Архітектури реальних систем штучного інтелекту можуть бути найрізноманітнішими. Для реалізації подібних систем розробляються спеціальні інструментальні програмні засоби. Ці засоби припускають певну технологію створення систем. Подібна технологія включає ряд великих етапів, типовими з яких є наступні: вибір архітектури системи;

локальних цілей, що стоять перед кожним з них; принципів взаємодії й виробітки глобального рішення);

вивчення властивостей і поведінки середовища, з яким прийдеться мати справу системі, і подання цих знань у вигляді неформальної онтології. Цей етап часто називають добуванням знань про середовище;

подання глобальних (доступних всім системам) і локальних знань (доступних окремим системам), отриманих на етапі добування знань, формальною мовою якогось обчислення у вигляді формальних глобальної та локальної онтологій. Цей етап часто називають формалізацією;

Рухомий склад залізниць

вибір стратегії висновку, на основі використання якої система буде досягати поставленої перед нею мети;

розробка програми і апаратури, що реалізує систему. Цей етап іноді називають реалізацією.

Розподілена СППР для локомотивних бригад являє собою складну систему з комплексною взаємодією розташованих на великій відстані бортових локомотивних систем і якість її організації визначає ефективність системи в цілому.

Якщо Π – множина можливих принципів $n \in \Pi$ побудовання системи і її елементів; F – множина взаємозв'язаних функцій, що виконуються системою; A – множина взаємозв'язаних бортових локомотивних систем, тоді згідно до [6] задача синтезу раціональної структури розподіленої СППР полягає в визначенні множини принципів побудови ($n \in \Pi$), множини функцій, що виконуються системою ($f \in F(n)$), множини елементів, здатних реалізувати обрані принципи і виконати функції ($\bar{A} \in A$), а також оптимального відображення елементів множини f на елементи множини \bar{A} . При

виборі варіанта структури локомотивної системи можливі два види відображення $f \rightarrow \bar{A}$: перший, коли кожна задача виконується лише одним з декількох можливих вузлів системи, і другий, коли задача виконується декількома вузлами системи. Вимоги до локомотивних систем потребують реалізації за другим варіантом.

На практиці для вирішення задачі створення оптимальної структури розподіленої СППР широко застосовується агрегативно-декомпонентний метод [6], котрий включає два етапи: декомпозицію задачі на низку часткових задач і агрегування часткових результатів. Таким чином, під проектуванням оптимальної структури СППР для локомотивних бригад будемо розуміти процес поступового рішення задач синтезу основних елементів і частин системи (рисунок 1).

В результаті аналізу існуючих типів інтелектуальних систем, ієрархій та алгоритмів їх роботи, враховуючи умови роботи локомотивних бригад та залізничного транспорту в цілому, розроблені параметри інтелектуальної СППР (зведені до таблиці 1)

Таблиця 1 - Характеристики СППР для локомотивних бригад

Ознака, за якою класифікується СППР	Найменування параметру	Описання параметру
Тип структурованості вирішуваних проблем	Слабоструктуровані	Вихідні параметри містять як кількісні, так і якісні елементи
Характер розподіленості	Просторово функціонально розподілені	Складаються з окремих зв'язаних між собою локальних локомотивних СППР, що можуть вирішити загальну проблему тільки разом
Характер оцінки результатів рішення	Рішення, що об'єктивно оцінюються	Оцінка результату основана на явно заданих критеріях, що визначають досягнення цілі: витрати палива, міжремонтний пробіг, показники безпеки руху тощо.
Характер ситуації, в якій ОПР приймає рішення	Екстремальні ситуації	Прийняття рішення по керуванню поїздом характеризується дефіцитом часу та обстановкою, що швидко змінюється.
Тип комп'ютерного аналізу ситуацій	Динамічний	Мається набір сценаріїв по керуванню поїздом, з якого обирається один найбільш ефективний на даний момент

Рухомий склад залізниць

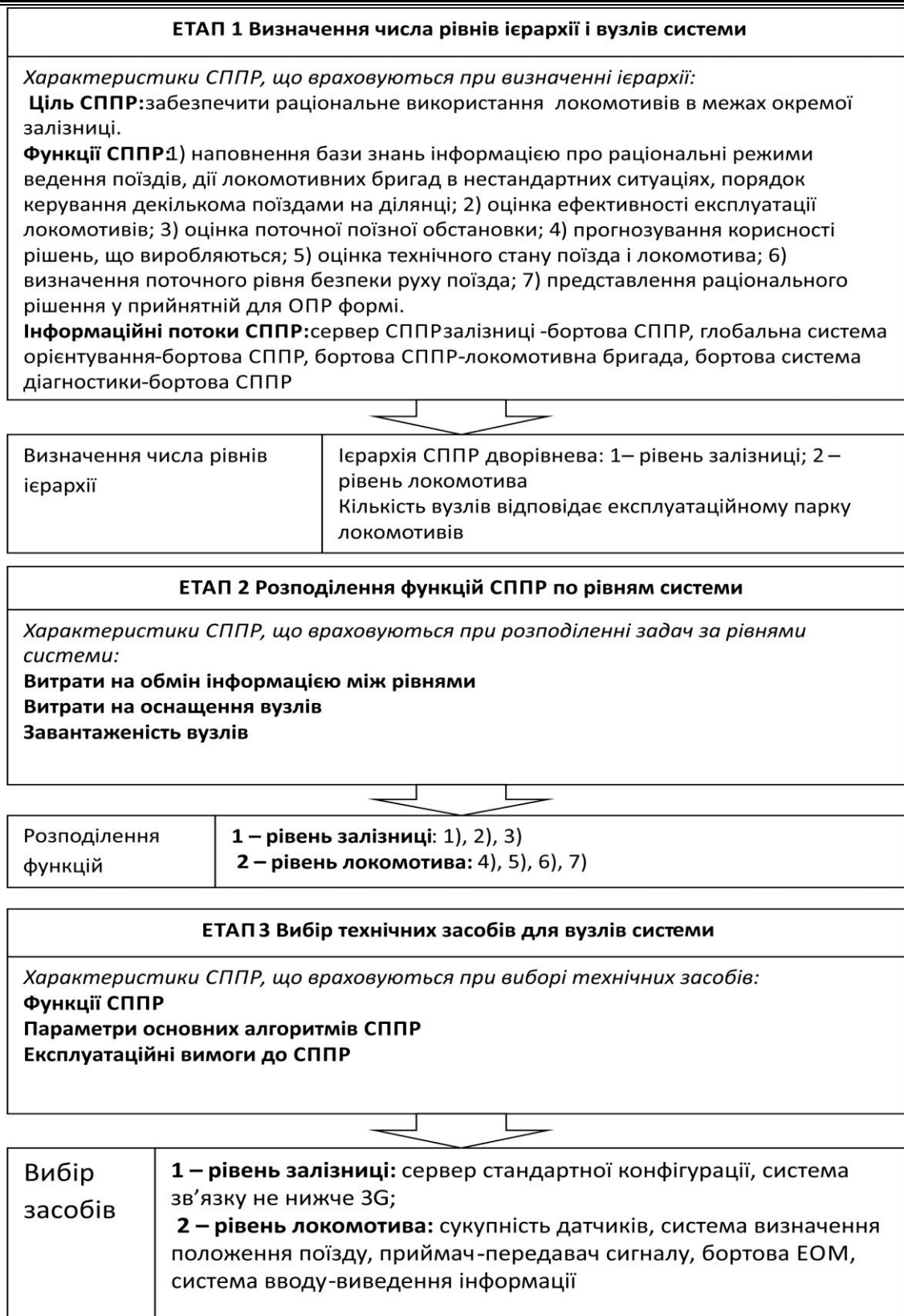


Рис. 1. Етапи синтеза структури СППР

Наведені на рисунку 1 задачі вирішуються ітераційно в силу їх взаємозв'язку, неповноти вихідних даних і необхідності корегування отриманих рішень.

СППР сприймає зовнішню поїзну обстановку за допомогою датчиків x_1, \dots, x_m і впливає на неї за допомогою виконавчих органів z_1, \dots, z_m .

Рухомий склад залізниць

Поводження інтелектуальної системи складається в переробці сприйняття у реакції. Ця переробка здійснюється за допомогою спеціального вирішувача, що функціонує на основі закладених у нього знань.

Спрощений принцип роботи системи показаний на рисунку 2. СППР одержує повідомлення від системи збору інформації

про параметри ведення поїзда. Завданням її є аналіз різних ситуацій під час руху на основі цих повідомлень і видача машиністу результатів цього аналізу. Машиніст оцінюючи результати роботи СППР, а також своє сприйняття ситуації, виконує керуючі впливи на рух поїзда.

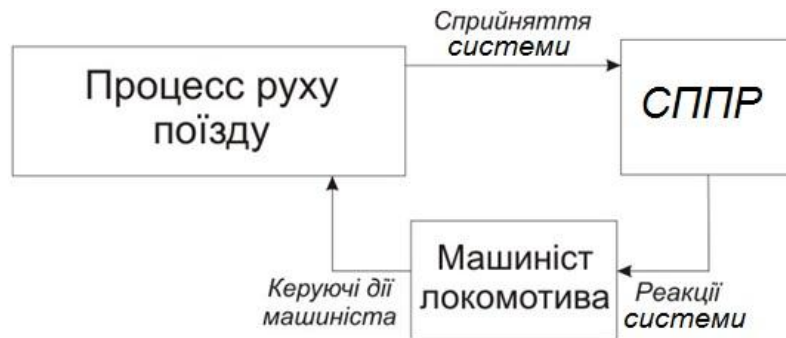


Рис. 2. Принцип роботи бортової локомотивної СППР

Пропонується структура локомотивної СППР, що наведена на рисунку 3.

Людино-машинний інтерфейс призначений для забезпечення взаємодії локомотивних бригад та обслуговуючого персоналу з системою. Тут присутні системи введення та системи відображення інформації.

Нечіткий класифікатор необхідний для моніторингу, розпізнавання та передачі в систему образів ситуацій, в яких знаходиться поїзд під час руху. Інформація до нього надходить з інтерфейсної частини СППР, призначення якої перетворити фізичні сигнали різних контрольованих величин у прийнятну для сприйняття системою форму.

Підсистема логічного висновку, використовуючи формалізовані знання, виробляє рекомендації з керування локомотивом. Тут реалізується певна стратегія вибору правил, пов'язана з методом представлення знань в СППР та врахуванням завдання енергозбереження від час керування поїздом.

Підсистема самонавчання забезпечує відбір та запам'ятовування таких прийомів керування локомотивом з боку бригади, які

забезпечили найменші витрати енергоресурсів на тягу. Інформація від підсистеми навчання поступає на сервер залізниці в метабазу через підсистему керування базою знань. Це забезпечує доступ до оновлених правил всіх бортових СППР. Підсистема керування базою знань є основним інформаційно-перетворюючим елементом системи, що забезпечує доступ інших підсистем до знань та даних.

Нейромережа оцінки складності нештатних ситуацій забезпечує постійний моніторинг обставин руху на предмет безпеки [7] і результатом її розрахунків є параметр, величина якого знаходиться в інтервалі від 0 (небезпека повністю відсутня) до 1 (максимальна небезпека, що гарантовано призведе до транспортної події). Вона враховує широкий спектр факторів, що впливають на безпеку руху: технічний стан локомотива, поточна швидкість і відстань до світлофору, умови навколишнього середовища, характеристики поїзда та ефективність гальм, психо-фізіологічні характеристики локомотивної бригади, поточний час доби, наявність обмежень швидкості на ділянці і багато інших кількісних та якісних показників.

Рухомий склад залізниць

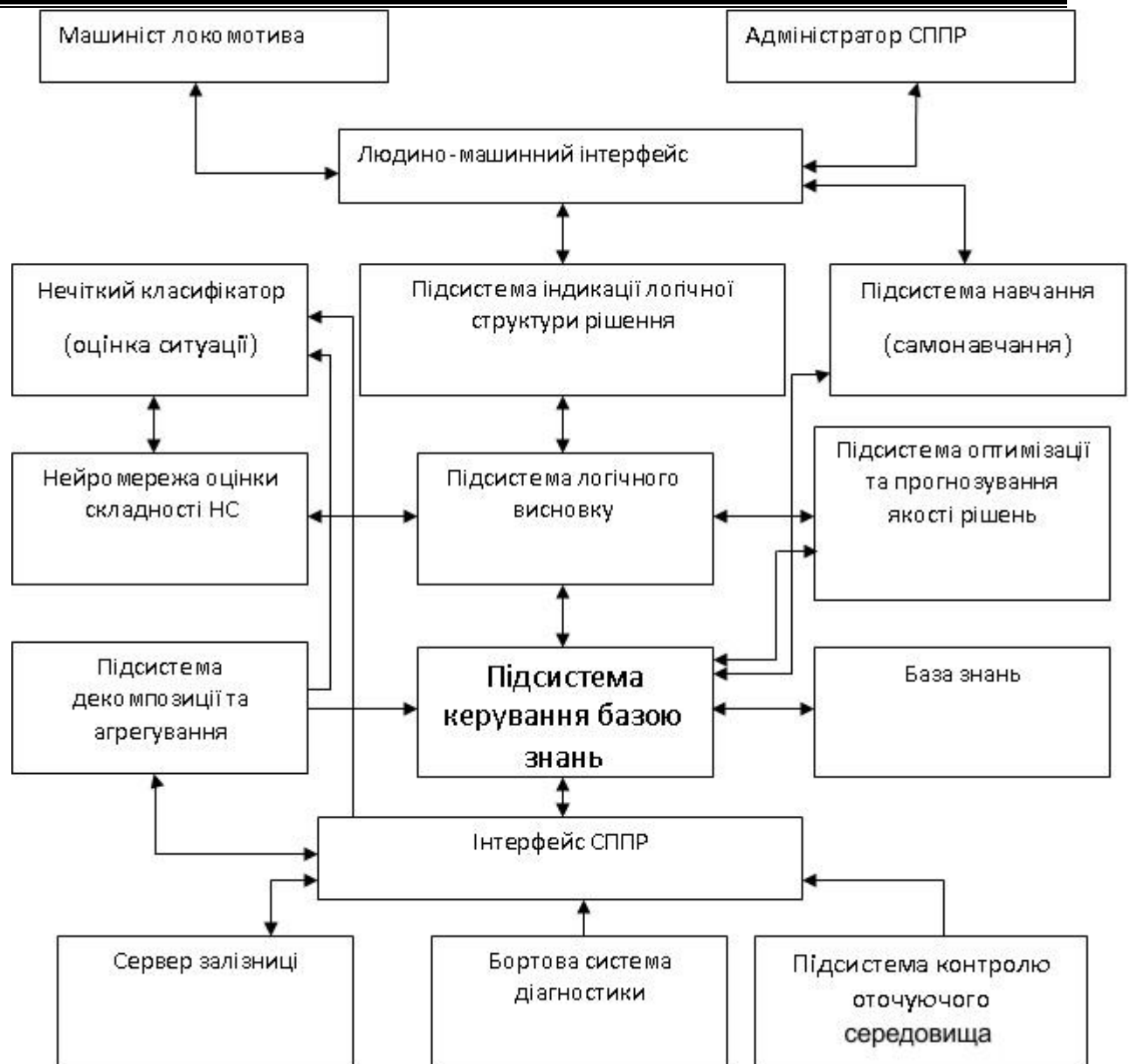


Рис. 3. Структура бортової локомотивної СППР

Висновки. В роботі визначено етапи синтезу структури СППР для локомотивних бригад. Використовуючи ці етапи створено конструкцію розподіленої системи, що дозволить підвищити ефективність експлуатації локомотивів за рахунок визначення та збереження в базі знань найраціональніших прийомів керування.

Під час ведення поїзду машиністу пропонується застосувати визначений режим, що найкраще відповідає поточним значенням профілю колії, маси складу, показанням світлофорів, погодним умовам та ін. Особливістю даної структури є наявність блока, що оцінює поточний ступінь складності нештатної ситуації, що дає змогу виробляти рішення не тільки з позиції раціональності та зниження енерговитрат, але і враховувати вплив реалізації цих рішень на безпеку руху.

Список використаних джерел

1. Russel, S. Artificial Intelligence. A Modern Approach. Second edition / S. Russel, P. Norvig. — New Jersey: Prentice Hall, 2003. — 1408 p.
2. Геловани В. Л. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. / В. Л. Геловани, А. А. Башлыков, В. Б. Бритков, Е. Д. Вязилов. — М.: Эдиториал УРСС, 2001. — 304 с.
3. Мелихов А.Н. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1990. - 272 с.
4. Ротштейн А. П. Нечеткая надежность алгоритмических процессов. / А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба – Винница:Континент, 1997. – 142 с.
5. Тарасов В.А. Интеллектуальные системы поддержки принятия решений. Теория, синтез, эффективность. / В.А. Тарасов, Б. М. Герасимов, И. А. Левин, В. А. Корнейчук. – К.:МАКНС, 2007. – 336 с.
6. Цвиркун А. Д. Основы синтеза структуры сложных систем. / А. Д. Цвиркун – М.:Наука, 1982. – 200 с.
7. Горобченко О. М. Формалізація задачі поточної оцінки безпеки руху при управлінні локомотивом / О. М. Горобченко. // Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». – Вип. 24. - К.: ДЕДУТ, 2014. - С. 214-221

Бабанін Олександр Борисович, докт. техн. наук, проф. кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу» Український державний університет залізничного транспорту

Ломотко Денис Вікторович, докт. техн. наук, проф. кафедри «УВКР» Український державний університет залізничного транспорту

Горобченко Олександр Миколайович, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу» Український державний університет залізничного транспорту, тел. +380635802713 ел. пошта superteacher@yandex.ru

Babanin Aleksandr, Doct. of techn. sciences, prof. department "Maintenance and repair of rolling stock", Ukrainian State University of Railway Transport

Lomotko Denis, Doct. of techn. sciences, prof. department "MLKW", Ukrainian State University of Railway Transport

Gorobchenko Aleksandr, PhD, department "Maintenance and repair of rolling stock", Ukrainian State University of Railway Transport, tel. +380635802713, e. mail superteacher@yandex.ru

Стаття поступила 21.04.2015

УДК 629.4.089

УДОСКОНАЛЕННЯ ПІДХОДІВ ЩОДО КОРЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТО, ПР ЛОКОМОТИВІВ В ПІСЛЯ НОРМАТИВНИЙ ПЕРІОД ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Докт. техн. наук О.С. Крашенінін

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К КОРРЕКТИРОВКЕ ТЕХНОЛОГИИ ТО, ТР ЛОКОМОТИВОВ В ПОСЛЕ НОРМАТИВНЫЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

Докт. техн. наук А.С. Крашенинин

IMPROVED TECHNOLOGY APPROACHES TO CORRECTION MAINTENANCE, CURRENT REPAIR LOCOMOTIVES REGULATORY PERIOD AFTER OPERATION

Doct. of techn. sciences A. Krashenin

У зв'язку із фізичним і моральним зносом локомотивного парку важливим напрямком забезпечення ефективності експлуатаційної роботи залізничного транспорту в досяжній

Рухомий склад залізниць

перспективі є раціональне використання наявного рухомого складу в межах призначеного і подовження термінів служби. Разом з цим, як показують дослідження, для обладнання локомотивів не завжди повністю відомі необхідні характеристики їх надійності. Зокрема, це відноситься до функції розподілу часу непередбачених відмов обладнання, що в період після нормативної експлуатації не дозволяє в повній мірі досягти обгрунтованого обсягу робіт з ТО, ПР для забезпечення їх технічного стану.

В статті розглянуто підхід щодо врахування співвідношень наробки і технічного стану обладнання локомотивів за допомогою методу статистичних випробувань при коректуванні технології утримання локомотивів, особливо при перевищенні нормативних пробігів.

Ключові слова: *система утримання локомотивів, метод статистичного випробування.*

В связи с физическим и моральным износом локомотивного парка важным направлением обеспечения эффективности эксплуатационной работы железнодорожного транспорта в обозримой перспективе является рациональное использование имеющегося подвижного состава в пределах назначенного и удлинение сроков службы. Вместе с тем, как показывают исследования, для оборудования локомотивов не всегда полностью известны необходимые характеристики их надежности. В частности, это относится к функции распределения времени непредвиденных отказов оборудования, в период после нормативной эксплуатации не позволяет в полной мере достичь обоснованного объема работ по ТО, ПР для обеспечения их технического состояния.

В статье рассмотрен подход относительно учета соотношений наработки и технического состояния оборудования локомотивов с помощью метода статистических испытаний при корректировке технологии содержания локомотивов, особенно при превышении нормативных пробегов.

Ключевые слова: *система содержания локомотивов, метод статистического испытания.*

Due to the wear and tear of locomotive fleet important area to ensure operational efficiency of rail transport in the foreseeable future is the rational use of existing rolling stock within the assigned and longer life. However, studies show that for the equipment of locomotives are not always fully known necessary characteristics of their reliability. In particular, this applies to the distribution function of the time of unforeseen equipment failures, since the regulatory operation does not allow to fully achieve the sound volume of works on TO, PR for their technical condition.

The article describes the approach on accounting relations developments and technical state of equipment of locomotives by the method of statistical tests to adjust the technology content of locomotives, especially in excess of regulatory runs.

Key words: *the content of locomotives, the method of statistical tests.*

Вступ. Впродовж останніх років за завданням Укрзалізниці інтенсивно виконуються науково-технічні розробки і дослідження щодо збільшення термінів служби локомотивів без погіршення показників безпеки руху та надійності, що передбачає необхідність враховувати термін експлуатації при визначенні і коректуванні обсягів робіт з ТО, ПР.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями. Забезпечення подовження терміну експлуатації наявних локомотивів повинно

вирішуватись шляхом дотримання оптимального співвідношення заходів з коректування стратегії (міжремонтних пробігів) і тактики (обсягів ТО, ПР локомотивів).

Це потребує врахування співвідношень реальної наробки локомотива і технічного стану обладнання локомотивів для формування скоректованої системи утримання локомотивів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням визначення та поліпшення техніко-економічних показників функціонування тягового рухомого складу

приділяється багато уваги як в нашій країні, так і за кордоном. Фундаментальні дослідження в цьому напрямку виконувались і виконуються як в наукових організаціях так і на виробничих підприємствах.

Значна частина проведених досліджень щодо удосконалення системи утримання ТО, ПР локомотивів направлена на удосконалення конкретних технологічних заходів по їх утриманню, але іноді без врахування терміну їх експлуатації. Основні підходи побудовані на концепції заміни (списання, завершення терміну експлуатації) технічних засобів, коли собівартість експлуатації на старих технічних засобах стає більшою, ніж приведена собівартість, отримана за допомогою нових технічних засобів. Інші – концепції заміни технічних засобів по мірі збільшення терміну служби, коли починають критично зменшуватися величини витрат на відновлення капітальних вкладень, а також рості відставання старого технічного засобу від нового за експлуатаційними показниками.

Кожен з підходів має свої переваги і недоліки, але в деякій мірі не спроможний в повній мірі забезпечити тривале і ефективне використання локомотивів за призначенням.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою статті є розробка методики коректування ТО, ПР локомотивів в після нормативний період експлуатації методом статистичних випробувань.

Основна частина дослідження. Відомий ряд методів визначення оптимальних режимів технічного обслуговування обладнання локомотивів, заснованих на аналітичному зв'язку параметрів, що характеризують стан локомотивів або їх обладнання з показниками ефективності – рівнем безвідмовності, трудовими або матеріальними витратами. Застосування цих методів при обґрунтуванні режимів ТО, ПР показало можливість використання єдиного підходу при обґрунтуванні нормативів ТО, ПР обслуговування та одного з їх елементів – діагностики. Однак чисто аналітичні методи мають певні обмеження та недоліки.

Аналітичний розв'язок завдання серйозно ускладнюється в умовах варіації наробітків на відмови або несправності, фактичних періодичностей і трудомісткостей технічного обслуговування і ремонту.

Досвід показує на доцільність використання для розв'язку подібних завдань методу статистичних випробувань.

Сутність і процедура методу статистичних випробувань зводиться до побудови штучної моделі, що володіє необхідними властивостями реальної системи; до експериментуванню зі штучною моделлю, тобто одержанню необхідних залежностей, оцінок, характеристик; до визначення точності отриманих результатів. Реалізація методу статистичних випробувань зводиться до «розіграшу» окремих випадкових величин і одержанню їх комбінацій відповідно до моделі реального процесу.

Так трудомісткість технічного обслуговування може бути отримана методом статистичних випробувань в такий спосіб:

- створюються масиви, що характеризують розподіл трудомісткості технічного обслуговування кожної операції. Масив включає фактичні експериментальні дані або дані, розраховані виходячи з виду і параметрів закону розподілу випадкової величини;

- з кожного масиву у випадковому порядку вибирається одне значення випадкової величини;

- випадкові значення трудомісткостей підсумовують і дають одну реалізацію випадкового процесу трудомісткості обслуговування групи операцій;

- повторюючи багаторазово розіграші та підсумовування, одержують статистичний матеріал, який потім обробляють методами математичної статистики.

Розглянемо деяку монотонну зміну параметра технічного стану обладнання δ за часом або пробігом за випадковий наробіток на відмову, що має вигляд $x_i(\bar{x}, \sigma_x, v_x)$ (рис. 1). Для обладнання проводиться ТО, яке в загальному випадку складається з контрольної частини, виконуваної із середньою періодичністю \bar{l}_i , що має варіацію (l_i, v_j, σ_j) , і виконавської, що проводиться за результатами контролю з деякою імовірністю, стаціонарне значення якої дорівнює коефіцієнту повторюваності K .

Як наробіток на відмову, так і фактичні періодичності технічного обслуговування, можуть задаватися

Рухомий склад залізниць

аналітично у вигляді конкретних законів розподілу і їх параметрів $(\bar{l}, \sigma_c, v_e, \bar{x}, \delta_x; v_x)$, а також і масивом фактичних даних $[X], [l]$.

В обох випадках при використанні методу статистичного випробування обираються у випадковому порядку і дорівнюються для пари випадкових величин – наробіток і періодичність: $x_i - l_i, x_k - l_k$ і т.д. стан відмови та відповідний наробіток на відмову x_i звичайно зв'язуються з конкретним припустимим значенням параметра технічного стану δ_d , що є точковою оцінкою.

Враховуючи, що як визначення самого значення граничного стану, так і визначення пробігу або часу роботи, йому відповідного, мають певну точність, доцільно ввести

наступні поняття: допуск на параметр технічного стану $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2$; допуск до наробітку на відмову. Параметри $\Delta x = x_i^{\max} - x_i^{\min}$ δ_i і x_i^{\min} відповідають порогу прогнозу (або чутливості діагностики)

$$x_i^{\min} = \varepsilon_n x_i; 0 \leq \varepsilon_n \leq 1,$$

де ε_n - коефіцієнт чутливості прогнозу, що залежить від точності застосовуваних контрольно-діагностичних методів, наявності інформації про закономірності зміни параметра технічного стану й ступені його розсіювання.

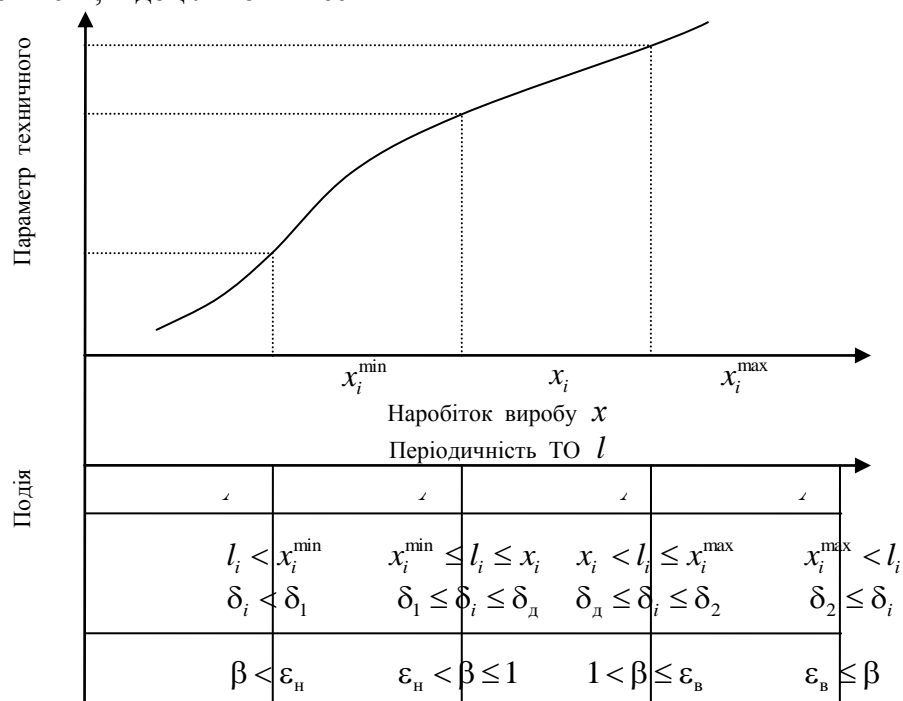


Рис. 1

Між Δx і $\Delta\delta$ існує наступна залежність;

$$\Delta\delta \cong \Delta x t g \alpha = \bar{a},$$

де \bar{a} - середня інтенсивність зміни параметра технічного стану в зоні відмови. При значнім розсіюванні значення \bar{a} може бути замінене на $a_d = \bar{a} \cdot \mu$, де μ - коефіцієнт максимальної інтенсивності зміни параметра технічного стану.

При випадковій комбінації x_i і l_i можливі чотири події (рис. 1):

- Перша подія A_1 : $l_i < x_i^{\min}$; $\delta_i < \delta_1$ - контрольна частина операції виконується, виконавська частина не виконується; Друга подія A_2 : $x_i^{\min} \leq l_i \leq x_i$; $\delta_1 \leq \delta_i \leq \delta_d$ - контрольна частина виконується, виконавська частина операції виконується з урахуванням попередження; Третя подія A_3 : $x_i \leq l_i \leq x_i^{\max}$; $\delta_d \leq \delta_i \leq \delta_2$ - контрольна частина операції виконується, виконавська частина виконується з урахуванням допуску;

Четверта подія A_4 : $x_i^{\min} < l_i$; $\delta_2 < \delta_i$ - відмова. Якщо подія A_4 пов'язана з фізичною відмовою, а не з фіксацією стану ($\delta_i \geq \delta_2$), то контрольна частина не виконується, а виконавська частина зводиться до усунення відмови, тобто проведенню ремонту.

У таблиці 1 наведені вартості і імовірності реалізації подій.

Таблиця 1

Подія	Вартість		Імовірність	Число реалізацій	Подія	Вартість		Імовірність	Число реалізацій
	Контрольна частина (контроль і ухвалення рішення)	Виконавська частина				Контрольна частина (контроль і ухвалення рішення)	Виконавська частина		
A_1	r_1	$d_1=0$	P_1	n_1	A_3	r_3	d_3	P_3	n_3
A_2	r_2	d_2	P_2	n_2	A_4	r_4	d_4	$P_4=3$	n_4

При переході від події A_1 до наступних подій невизначеність при ухваленні рішення скорочується, тому в загальному випадку слушне співвідношення $r_1 > r_2 > r_3 > r_4$, причому при фізичній відмові $r_4=0$.

Сумарні питомі витрати на обслуговування та ремонт за цикл дорівнює

$$C_{\Sigma} = \frac{\alpha}{l} [P_1 r_1 + P_2 r_2 + P_3 r_3 + P_4 (c + r_4) + kd]$$

Наробіток на випадок відмови при проведенні профілактичних технологічних заходів і відповідний параметр потоку відмов дорівнюють:

$$\bar{L} = \frac{(n_1 + n_2 + n_3) \cdot \bar{l}}{n_4} = \frac{\bar{l}}{\alpha P_4};$$

$$\lambda_{II} = \frac{\alpha P_4}{l}.$$

Умови економічної ефективності технологічних заходів $C_{\Sigma} \leq C'_{II}$ або

$$\left\{ \frac{c}{x} - \frac{\alpha}{l} [P_1 r_1 + P_2 r_2 + P_3 r_3 + P_4 (c + r_4) + kd] \right\} \geq 0$$

Скорочення параметра потоку відмов у міжремонтних періодах у випадку прийняття відповідного технологічного варіанта:

$$\Delta\lambda = \lambda'_{II} - \lambda_{II} = \frac{\bar{L} - \bar{x}}{xL}$$

або

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{l} - \bar{x} P_4 \alpha}{x l} = \frac{\beta - \alpha P_4}{l},$$

звідки визначаємо просте правило доцільності проведення технологічних заходів з обслуговування по безвідмовності.

Крім цього, надається можливість визначення середньої вартості (трудомісткості) проведення технологічних операцій:

$$d_{II} = \alpha [P_1 r_1 + P_2 (r_2 + d) + P_3 (r_3 + d)].$$

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.

1. Запропонований метод дозволяє реалізувати кілька варіантів оптимізації, серед яких найважливішими є наступні.

Варіант 1 – при заданих характеристиках безвідмовності або довговічності обладнання $(\bar{x}; \sigma_x; v_x)$, вартості ремонту c , а також припустимій безвідмовності в міжремонтні періоди $1 - P_4$ визначити доцільність технологічних заходів і режимів їх проведення $(\bar{l}; \sigma_l; v_l; r_1; r_2; r_3; r_4; d)$.

Варіант 2 – при заданих характеристиках безвідмовності або довговічності обладнання $(\bar{x}; \sigma_x; v_x)$, а також їх ремонтпридатності $(r_1; r_2; r_3; r_4; c; d)$ визначити доцільність відповідних технологічних заходів, їх режими та імовірність відмов у міжремонтні періоди.

Варіант 3 – при заданих характеристиках безвідмовності або довговічності обладнання $(\bar{x}; \sigma_x; v_x)$, вартості ремонту c і виконавської частини операції (d_n) визначити режими технологічних заходів $(\bar{l}; \sigma_j; v_j)$ і їх стратегію (з контролем, без контролю, із прогнозом і т.д.), а також точність і вартість контрольних-діагностичних операцій устаткування $(r_1; r_2; r_3; r_4; \varepsilon_n; \varepsilon_b)$.

2. Розроблена процедура є подальшим розвитком техніко-економічного і економіко-

імовірнісного методів, поєднує можливі організаційні і технологічні варіанти, що виникають при розв'язку технологічних завдань, і дозволяє: вибрати стратегію і режим технологічних заходів; визначити та коректувати технологію та організацію виконання.

3. . профілактичних робіт (без контролю, з контролем різної глибини і вартості).

Список використаних джерел

- 1 Тартаковский, Э.Д. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог: Монография [Текст] / Э.Д. Тартаковский, С.Г. Грищенко, Ю.Е. Калабухин, А.П. Фалендыш. – Луганск: Изд-во «Наулирис». 2011. – 174 с. – Ил. 63 табл. 12, список лит. 191 наим.
2. Азгальдов, Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) [Текст]. – М.: Экономика, 1982. – 256 с.
3. Бурдаков, В.Д. Об оценке технического уровня транспортных средств [Текст] // Стандарты и качество, 1988. – С. 112
4. Смирнов, Н.Н. и др. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов [Текст]. – М.: Транспорт, 1974, - 364 с.
5. Г. Хантли. Анализ размерностей [Текст]. – М. Мир, 1970. – 176 с.
6. Сухарев Э.А. Теория эксплуатационной надежности машин / Лекционный курс [Текст]. – Рівне: Видавництво УДАВГ, 1997, 162 с.
7. Степанов, М.Н. Статические методы обработки результатов механических результатов / Справочник [Текст]. – М.: Машиностроение, 1985. – 232с.
8. Галкин, В.Г. Надежность тягового подвижного состава. / В.Г. Галкин, В.П. Парамзин, В.А. Четвергов. Учеб. Пособие для вузов ж.-д. трансп. [Текст] // М.: Транспорт, 1981, 184 с.
9. Северцев, Н.А. Надежность сложных систем в эксплуатации и обработке: Учебное пособие для вузов. [Текст]. – М.: Высш. шк., 1989. – 432 с.
10. Решетов, Д.Н. Надежность машин [Текст] / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. – М.: Высшая шк., 1988.
11. Козлов Б.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики [Текст]. Б.А. Козлов, И.А. Ушаков // М.: Изд-во «Советское радио», 1975 – 472с.

Крашенінін Олександр Семенович, доктор технічних наук, професор кафедри «Експлуатація та ремонт рухомого складу»

Krasheninina Aleksandr, d-r science, professor department of operation and maintenance of rolling stock Ukraine State University of Railway Transport. Tel.:

Стаття поступила 21.04.2015

УДК 629.4.027.11

ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ КОНТРОЛІ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ

Канд. техн. наук В.М. Петухов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ БУКСОВЫХ УЗЛОВ

Канд. техн. наук В.М. Петухов

ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES UNDER THE CONTROL OF AXLE BOXES

Cand. of techn. sciences V.M Petukhov

У роботі розглянуті принципи дистанційного теплового контролю та вбудованих засобів контролю технічного стану буксових вузлів рухомого складу. Наведено споживану потужність систем дистанційного контролю й вбудованих засобів контролю букс. Зроблено порівняльний аналіз існуючих і перспективних технологій контролю букс вагонів з точки зору їхнього енергоспоживання. Зроблено висновок про те, що технологія контролю буксових вузлів за допомогою вбудованих засобів контролю має кращі показники по енергозбереженню.

Ключові слова: енергозберігаючі технології, буксовий вузол, система теплового контролю, вбудований засіб контролю.

В работе рассмотрены принципы дистанционного теплового контроля и встроенных средств контроля технического состояния буксовых узлов подвижного состава. Приведены потребляемая мощность систем дистанционного контроля и встроенных средств контроля букс. Произведен сравнительный анализ существующих и перспективных технологий контроля букс вагонов с точки зрения их энергопотребления. Сделан вывод о том, что технология контроля буксовых узлов с помощью встроенных средств контроля имеет лучшие показатели по энергосбережению.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, буксовый узел, система теплового контроля, встроенное средство контроля.

The paper discusses the system of remote temperature monitoring of a technical condition of axle box units assemblies of cars and built-in control of the axle box units.

Presented power consumption of the different systems of control of axle boxes of cars.

The comparative analysis of existing and emerging technologies for the axle box units control their energy consumption.

Remote controls are most prevalent, but have a large power consumption. This is due to the maintenance of a fixed temperature within the apparatus to monitor.

Embedded systems have minimal power consumption and high reliability of monitoring indicators. They are mounted directly on the controlled elements of axle box. But their use is limited to technical problems.

It is concluded that the technology of control axle box units assemblies with built-in control has the best performance on energy efficiency. Therefore, such systems have a perspective of development and need to continue to work on the improvement and implementation of this technology on the railways of the country.

Keywords: energy-saving technologies, axle box, thermal control system, built-in control.

Вступ. Від технічного стану буксових вузлів вагонів безпосереднє залежить безпека руху, стабільність перевезень грузив та пасажирів. Тому контролю технічного стану букс завжди приділяється значна увага.

Прагнення подолати недоліки візуального контролю букс на ходу поїзда призвело до розробки апаратних методів контролю букс. Роботи в цьому напрямку на залізницях світу були розпочаті в 50-х роках минулого століття і розвивалися в напрямку створення вбудованих і дистанційних (безконтактних) систем контролю букс.

На даний час для виявлення пошкоджених буксових вузлів більш широко застосовують метод дистанційного контролю, як найбільш універсальний, тому що таким методом можна контролювати букси вантажних і пасажирських вагонів, а також локомотивів. Його суть полягає в тому, що пристрої контролю розташовуються в дискретних точках колії і послідовно контролюють температуру усіх букс минаючих поїздів.

Перші системи теплового контролю букс були розроблені фірмою Servo Corporation of America в 1956 р. з використанням приймачів інфрачервоного випромінювання (ІЧ-випромінювання).

На даний час принцип контролю не змінилося, змінювалось лише елементна база та програмне забезпечення засобів контролю. Найбільш поширені розповсюдження на залізницях країни отримали наступні системи теплового контролю (СТК) букс: АСДК-Б, ДИСК-Б, КТСМ.

До вбудованих систем контролю буксових вузлів ставляться пристрої, що розташовані в кожному буксовому вузлі й сигналізують про його несправність.

До достоїнств вбудованих засобів контролю варто віднести їхню простоту та безперервність контролю.

У цей час на залізницях України та країн СНД вбудованими засобами контролю букс обладнані тільки пасажирські вагони, наприклад, широко відома система СКНБ та її аналоги (СКНБ-П, СКНБ-К).

Для вантажних вагонів така система не застосовується через відсутність

провідного електричного з'єднання між вагонами.

У цей час підшипники з вбудованими датчиками стають стандартними компонентами сучасного рухомого складу [1]. Передові виробники буксових вузлів, такі як SKF (Швеція), FAG (Німеччина), Timken (США), оснащують свої букси такими системами.

В Україні також ведуться розробки вбудованих засобів для вантажного парку вагонів[2,4]

Постановка проблеми. Підвищення інтенсивності та швидкості перевезень викликає необхідність збільшення пунктів дистанційного контролю, а різноманітність та особливості конструкції ходових частин потребує додаткові пристрої для таких пунктів.

Враховує значну кількість пунктів контролю технічного стану букс, що використовуються на залізницях, проблема їх енергоспоживання стає край актуальною та своєчасною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд і аналіз робіт щодо методів контролю технічного стану буксових вузлів в експлуатації [5,6,7,8,9] показали, що дослідження, які проводяться останнім часом, більшою часткою спрямовані на точність та достовірність визначення технічного стану букс. Але, поза увагою дослідників залишилися питання енергоефективності технологій контролю.

Визначення мети та задач дослідження. Метою роботи є визначення найбільш ефективної технології контролю технічного стану буксових вузлів рухомого складу з точки зору енергозбереження.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати існуючі технології контролю букс;
- визначити енергоспоживання існуючих засобів контролю букс;
- зробити висновок, які технології контролю технічного стану букс є найкращими з точки зору енергоспоживання.

Виклад основного матеріалу дослідження Із пристроїв дистанційного

Рухомий склад залізниць

контролю буксових вузлів найбільше поширення у світовій практиці знайшли пристрої, засновані на перетворенні енергії інфрачервоного (ІЧ) випромінювання букс в електричний сигнал, пропорційний температурі елемента букси, що сканується [8].

Незважаючи на ряд суттєвих конструктивних відмінностей різних пристроїв для виявлення перегрітих букс, принцип їхньої дії однаковий. Він полягає в тому, що в результаті порушення нормального режиму тертя виділяється підвищена кількість тепла, і буксовий вузол сильніше розігрівається. ІЧ - випромінювання від

контрольованих елементів (корпус букси, маточина, кришка й т.д.) уловлюється спеціальною оптикою, що розташована в приколійних камерах, установлених по обидва боки залізничної колії. Оптика концентрує випромінювання на приймач, у якому теплові імпульси перетворюються в електричні.

Інформація у вигляді посиленних електричних сигналів розшифровується за допомогою логічних пристроїв. Сигнали від польового встаткування надходять по кабелях до постового встаткування - на стійку керування перегінним устаткуванням (рис. 1).

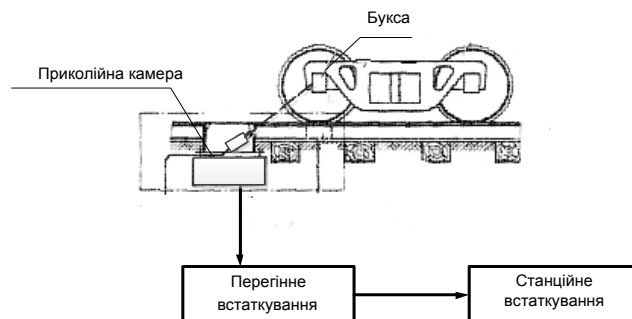


Рис. 1.Схема дистанційного контролю температури букс

Основними споживачами електричної енергії є приколійні камери, це пов'язано з необхідністю підтримання постійної температури чутливого елементів та апаратури. Кількість таких камер можливо

бути дві або чотири для одного пункту контролю, в залежності від системи, що використовується. Енергетичні характеристики систем теплового контролю наведені у таблиці 1

Табл.1. Енергоспоживання систем теплового контролю[9]

Система теплового контролю	Енергоспоживання, Вт
ПОНАБ-3	1350
ДИСК-Б	2000
КТСМ-02БТ	350
АСДК-Б	600

До вбудованих систем контролю буксових вузлів ставляться пристрої, що розташовані в кожному буксовому вузлі й сигналізують про його несправність. Оскільки більша частина несправностей буксового вузла приводить до його перегріву, як датчики в індивідуальних засобах контролю використалися різні теплові індикатори (вставки, що плавляться, термомари, терморезистори й т.п.). До достоїнств індивідуальних засобів контролю

варто віднести їхню простоту та безперервність контролю, до того ж нові міжнародні правила, такі як критерії, розроблені МСЗ для пасажирських вагонів і інструкції TSI (Технічна специфікація сумісності високошвидкісних поїздів у Європі) вимагають постійного контролю температури букс.

Для контролю температури букси у верхню частину її корпусу монтують спеціальний контактний термодатчик.

У середині корпусу датчика в ебонітовою втулці знаходиться легкоплавкий сплав, що з'єднує між собою кінці двох проводів. Сплав разом з проводами утворює розімкнутий контакт. Термодатчик ввертається разом з кільцем ущільнювача в корпус букси. При певній температурі букси (вище 105°C) сплав розплавляється і виливається в порожнину, розриваючи контакт між кінцями проводів.

Система контролю нагрівання буксових вузлів пасажирських вагонів з позисторними датчиками (СКНБП) складається з послідовно з'єднаних позисторних датчиків, розміщених по одному на кожній буксі, блоку контролю нагріву букс (БКНБ), розміщеного в пульті управління і підключеного до системи електропостачання вагона, і елементів контролю і управління винесених на лицьову панель пульта управління (сигнальна лампа, вимикач дзвінка, кнопка контролю справності ланцюгів), розташування яких залишається таким же як і в системі СКНБ.

СКНБП заснована на принципі контролю величини сумарного опору позисторних датчиків.

У розробленій НВП "Хартрон-Експрес" вітчизняній системі контролю нагрівання букс СКНБ-К для пасажирських візків моделей 68-7007 і 68-7012 застосовані напівпровідникові термодатчики, внутрішній опір яких змінюється залежно від зміни температури. Ці термодатчики працюють із блоками формування даних, які у свою чергу працюють із блоком обробки даних.

Системі типу СКНБ не мають активних елементів, тому їх енергоспоживання мінімальне.

Для пасажирських вагонів ВАТ "Российские железные дороги" впроваджується система моніторингу температурних режимів (СМТР) підшипникових вузлів вагонів пасажирських поїздів як компонент системи контролю безпеки й зв'язки пасажирського поїзда (СКБ і СПП).

В основі роботи СМТР лежить принцип дистанційного знімання інформації про поточну температуру букс пасажирського поїзда за допомогою радіодатчиків

температури й наступному висновку інформації на блок контролю керування.

На підшипникові вузли SKF з вбудованим гумовим ущільненням встановлені датчики - така конструкція забезпечує економію простору і запчастин, а також зручність експлуатації [1].

Обладнання вантажних вагонів вбудованими засобами контролю букс пов'язано з низкою технічних труднощів, такими як відсутність провідного з'єднання між вагонами, власного джерела енергії на вагоні. Всі ці фактори гальмували впровадження вбудованих засобів контролю букс для парку вантажних вагонів.

У зв'язку з швидким розвитком мікроелектроніки, а також бездротових технологій передачі даних стало можливим встановлювати різні датчики на контрольовані елементи букс.

Для вантажних вагонів компанією FAG (Німеччина) пропонується оснащення букс вбудованими системами контролю з невеликими генераторами.

Потужність одного такого буксового генератора може досягати 100 Вт, так що він здатний живити енергією таке бортове обладнання, як, наприклад, система моніторингу стану відповідальних вузлів, деталей вагона і цілісності вантажу, що перевозиться, приймачі для визначення місця розташування поїзда з використанням системи глобального позиціонування (GPS) і навіть апаратура електропневматичних гальм і протиюзного захисту. Також генератор використовують також як датчик частоти обертання для вимірювання та реєстрації швидкості руху поїзда. Установка системи на корпусі букси не пов'язана з якими-небудь змінами в конструкції основних деталей підшипників і букси.

У 2013 року кафедрою «Вагони» на ПАТ «Полтавський ГЗК» в рамках науково-дослідної роботи були проведені експлуатаційні випробування вбудованої системи контролю букс – буксової діагностичної станції (БДС).

Комплект БДС складається з наземної станції з двома модулями, що розташовуються по обох сторонах шляху і бортових модулів, які вмонтовують в кожній буксі (рис.2).

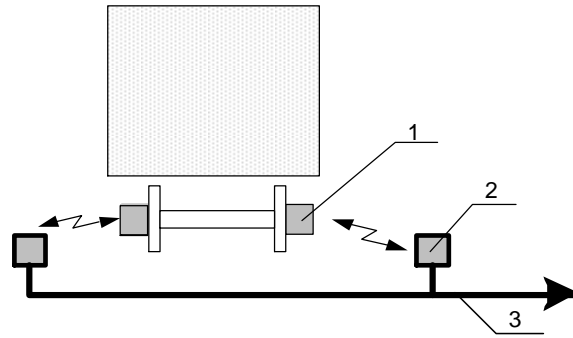


Рис.2 – Схема буксової діагностичної станції:

1 - бокса с бортовим модулем БДС; 2 – наземний модуль БДС; 3 – кабель USB.

Бортовий модуль при русі вагону безперервно вимірює контрольовані параметри і здійснює їх первинну обробку і зберігання. При запиті наземного модуля, що знаходиться на пункті контролю, бортовий модуль передає йому дані по радіоканалу.

Датчики, які розташовані безпосередньо на контрольованих елементах, дозволяють оперативно і точно оцінювати їх технічний стан, а також прогнозувати залишковий ресурс підшипника.

Споживана потужність одного пункту контролю невелика і складає 50мА [2].

Висновок. Таким чином виконаний аналіз засобів та технологій контролю технічного стану буксових вузлів рухомого складу показав, що вбудовані системи контролю мають найменшу величину енергоспоживання при кращій достовірності показників контролю.

Тому такі системи мають перспективу розвитку і потрібно далі продовжувати роботи по удосконаленню та впровадженню таких технологій на залізницях країни.

Список використаних джерел

1. Буксовые узлы с датчиками компании SKF для современного подвижного состава [Текст] / Железные дороги мира – 2008. – № 4 – С. 47–51.
2. Дослідна експлуатація вбудованої системи контролю буксових вузлів вагонів на шляху прямування та розробка рекомендацій щодо застосування даної системи на вантажному рухомому складі [Текст] : Звіт про НДР (заключ.) / Укр. держ. акад. залізнич. трансп.; кер. Мартинов І.Е.; викон.: Петухов В.М. [та ін.] – Х.; 2013. – 83 с. – Бібліогр.: с.81. – № ДР 0112U007565.
3. Інструкція з розміщення, встановлення та експлуатації засобів автоматичного контролю технічного стану рухомого складу під час руху поїзда [Текст] : ЦВ-ЦШ-0053 : затв. наказом Укрзалізниці 17.03.2003. – К.: Укрзалізниця, 2003. – 66 с. – (Відомчий нормативний документ Державної адміністрації залізничного транспорту України).
4. Мартинов И. Э. Натурные испытания встроенной системы контроля технического состояния буксовых узлов [Текст] / И. Э. Мартинов, В. М. Петухов // Мир транспорта. – 2013. – № 2. – С. 180–182.
5. Миронов А. А., Образцов В.Л., Павлюков А.Э. Технические средства диагностики ходовых частей подвижного состава [Текст] // Вагоны и вагонное хозяйство (Приложение к журналу "Локомотив") – 2005. – №2. – С. 42–46.
6. Миронов А. А. Анализ опыта эксплуатации технических средств контроля ходовых частей подвижного состава в движущихся поездах [Текст] / А. А. Миронов, В. Л. Образцов, В. Я. Соболев, К. В. Григорьев // Автоматика, связь, информатика. – 2005. – № 5. – С. 31–34.
7. Прогрессивные технологии обеспечения безопасности движения поездов и

сохранности перевозимых грузов [Текст]: Монография / В.А. Гапанович, И.И. Галиев, Ю.И. Матяш, В.П. Клюка. – М.: ГОУ "Учебно-методический центр по образованию на ж.-д. транспорте", 2008. – 220 с.

8. Регеда В. В. Анализ методов контроля букс грузовых вагонов на ходу поезда / В. В. Регеда, В. М. Петухов // 36. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 84. – Ч. 3. – С. 94–98.

9. Рекомендации по размещению, установке, эксплуатации и техническому обслуживанию систем автоматического контроля технического состояния подвижного состава во время движения [Текст] : Р 863 : Утв. совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 26.10.2007. – Варшава.: Комитет ОСЖД, 2007. – 55 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор І.Е. Мартинов

Петухов Вадим Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедри вагонів, контактний телефон: +38 (057) 730-10-35.

Petukhov Vadim, Ph.D., assistant professor of Wagons, Ukraine State University of Railway Transport. Tel.: +38 (057) 730-10-35

Стаття постуила 21.04.2015

УДК 629.4.077-592

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗРОБКИ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГАЛЬМ ПАСАЖИРСЬКИХ ВАГОНІВ

Канд. техн. наук В. Г. Равлюк, асист. Я. В. Дерев'янчук

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ТОРМОЗОВ ПАСАЖИРСКИХ ВАГОНОВ

Канд. техн. наук В. Г. Равлюк, ассист. Я. В. Деревянчук

REMOTE CONTROL BRAKE SYSTEM FOR A PASSENGER CARRIAGES

Candidate of technical sciences V. Ravlyuk, assistant Y. Derevyanchuk

Встановлено, що значна частина транспортних подій виникає через стан автоматичних гальм та стан колісних пар пасажирських вагонів. Вчасне виявлення таких несправностей як відмова електропневматичних гальм, завищення тиску в гальмівному циліндрі та гальмівній магістралі істотно покращить безпеку руху та зменшить кількість пошкоджень колісних пар.

Впровадження засобів технічного діагностування дасть змогу підвищити інтенсивність використання пасажирських вагонів, полегшити важку і небезпечну працю працівникам, які здійснюють контроль за процесом експлуатації пасажирських вагонів.

Ключові слова: аналіз, гальма, діагностування, контроль, несправність, обладнання, пасажирський вагон, система.

Установлено, что значительная часть транспортных происшествий возникает из-за состояния автоматических тормозов и состояние колесных пар пассажирских вагонов. Своевременное выявление таких неисправностей как отказ электропневматических тормозов, завышение давления в тормозном цилиндре и тормозной магистрали существенно улучшит безопасность движения и уменьшит количество поврежденных колесных пар.

Внедрение средств технического диагностирования позволит повысить интенсивность использования пассажирских вагонов, облегчить тяжелый и опасный труд работникам, которые осуществляют контроль за процессом эксплуатации пассажирских вагонов.

Ключевые слова: анализ, тормоза, диагностирование, контроль, неисправность, оборудование, пассажирский вагон, система.

The amount of transport events is analysed with passenger carriages for 10. It is set that considerable part of transport events arises up through the of automatic brakes and of wheelpairs of passenger carriages. The basic disrepairs of wheelpairs and far of their damages are set from work of automatic brakes.

The existent state of brake equipment requires introduction of the checking of their action systems, especially works of electropneumatic brakes. A timely exposure of such disrepairs as overstating of pressure is in a brake cylinder, overstating of pressure in a brake highway, the refuse of electropneumatic brakes substantially will improve safety of motion and will provide reduction of damages of wheelpairs.

Also one of major terms of providing of safety of railway transport ations there is wide introduction of facilities of the technical diagnosticating of the brake system of passenger carriages on the way of the following and preparation of them to exploitation. Introduction of facilities of the technical diagnosticating will give an opportunity to promote intensity of the use of passenger carriages, facilitate hard and dangerous work to the workers that carry out control after the process of exploitation of carriages.

Keywords: analysis, brakes, diagnostics, control, malfunction, equipment, passenger car, the system.

Вступ. Система технічного обслуговування та ремонту вагонів направлена на те, щоб на шляху прямування не виникали вимушені зупинки поїздів, а всі несправності, що виникають на шляху прямування, були виявлені та усунені після прибуття поїзда в пункт технічного обслуговування (або пункти підготовки вагонів до перевезень).

Звичайно по гарантійних дільницях щодобово проходить велика кількість поїздів, при проходженні яких виникають різного роду відмови.

На перевізний процес впливають тільки відмови тих вузлів вагонів, для відновлення яких необхідна зупинка поїзда або затримка його над встановлену норму. Одним із таких вузлів пасажирського вагона є гальмове обладнання.

Робота автоматичних гальм пасажирських поїздів є важливою складовою частиною забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті. Своєчасне виявлення несправного елемента гальмової системи вагона дозволяє визначити заходи покращення безвідмовної роботи гальмової системи в цілому, що дасть змогу скоротити час на усунення несправностей на шляху прямування [1].

Забезпечення чіткої та надійної роботи гальмової системи в процесі експлуатації пасажирських поїздів є одним із головних завдань системи технічного обслуговування та ремонту вагонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з основних складових частин рухомого складу є гальмівна система. Саме її технічний стан головним чином впливає на надійну та безпечну експлуатацію поїздів. Зусилля багатьох дослідників спрямовані на підвищення надійності та удосконалення гальмових систем рухомого складу. Питаннями удосконаленням гальмівного обладнання та підвищення безпеки руху поїздів на залізничному транспорті займалися науковці у багатьох вишах серед них такі, як: В. В. Крилов, А. В. Казарінов, Г. В. Гогрічіані, М. І. Глушко, Г. Б. Нікітін, І. В. Абашкін, В. Р. Асадченко, В. М. Сайн, В. М. Щегров, Е. І. Галай, М. В. Коренівський, С. І. Нечволода, А. М. Бабаєв, Д. В. Дмитрієв, Н. В. Маликов та ін [2, 3, 6, 8].

Для зменшення кількості транспортних подій на залізничному транспорті щорічно виконують аналіз [1]. За яким розробляють ряд заходів, які дають можливість покращити ситуацію на

Рухомий склад залізниць

залізницях. У багатьох випадках причиною виникнення транспортних подій є несправність гальмівного обладнання і колісних пар, які не завжди вдається виявити при виконанні технічного огляду поїздів, а також контролю їх на шляху прямування під час руху [4].

У США застосовується система діагностування гальмових систем поїздів, яка дозволяє здійснювати контроль тисків і витоків з гальмової магістралі в головній і хвостовій частині поїзда, а також процесу гальмування і відпуску гальм. Вся інформація виводиться на дисплеї, який розташований у кабіні машиніста [5].

Мета статті. Здійснити аналіз стану відмов гальмівного обладнання пасажирських вагонів. На основі якого розробити заходи з удосконалення контролю гальмівного обладнання на шляху прямування пасажирських поїздів, які б дали змогу зменшити кількість транспортних подій.

Викладення основного матеріалу. Безпека руху на залізничному

транспорті в значній мірі залежить від надійної роботи гальмового обладнання пасажирських вагонів. У зв'язку з цим періодичний контроль за станом найбільш відповідальних вузлів гальмівної системи пасажирського вагона проводиться кожні шість місяців при єдиній технічній ревізії (ЄТР).

Аналізуючи транспортні події у пасажирському господарстві за останні роки можна відмітити їх зменшення, що напряму пов'язане зі зменшенням кількості пасажирського рухомого складу за останні роки (рис. 1).

Зменшення кількості відмов у процесі експлуатації пасажирських вагонів відбувається за рахунок підвищення якості ремонту на вагоноремонтних підприємствах. У результаті цього значно зменшується кількість транспортних подій в цілому по Укрзалізниці (рис. 1). Однак необхідно відмітити, що за останні роки кількість відмов, які припадають на гальмове обладнання значно зростає [1].

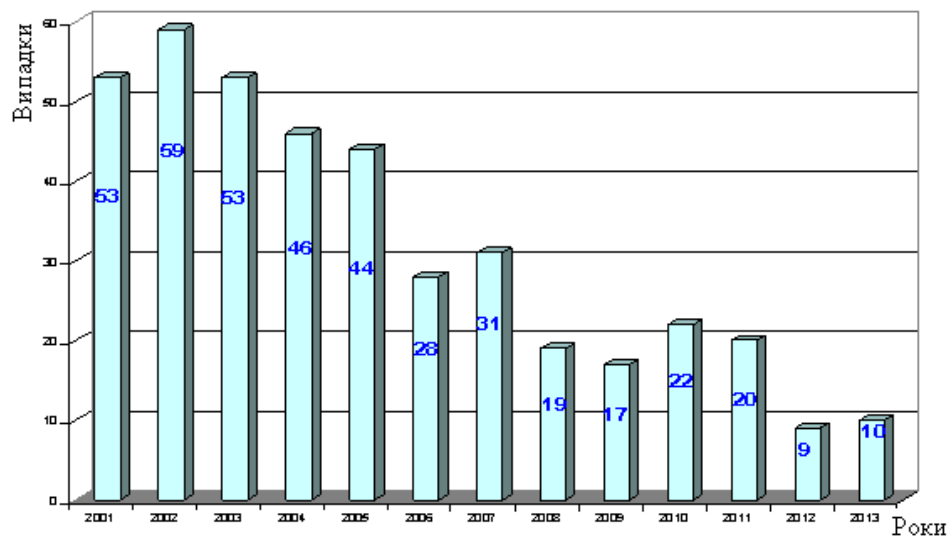


Рис. 1. Розподіл кількості транспортних подій за роками

Якщо виділити з транспортних подій пасажирських вагонів, тоді видно що тільки ті, які виникли через відмову гальм відсоткова кількість їх значно зросла (рис. 2).

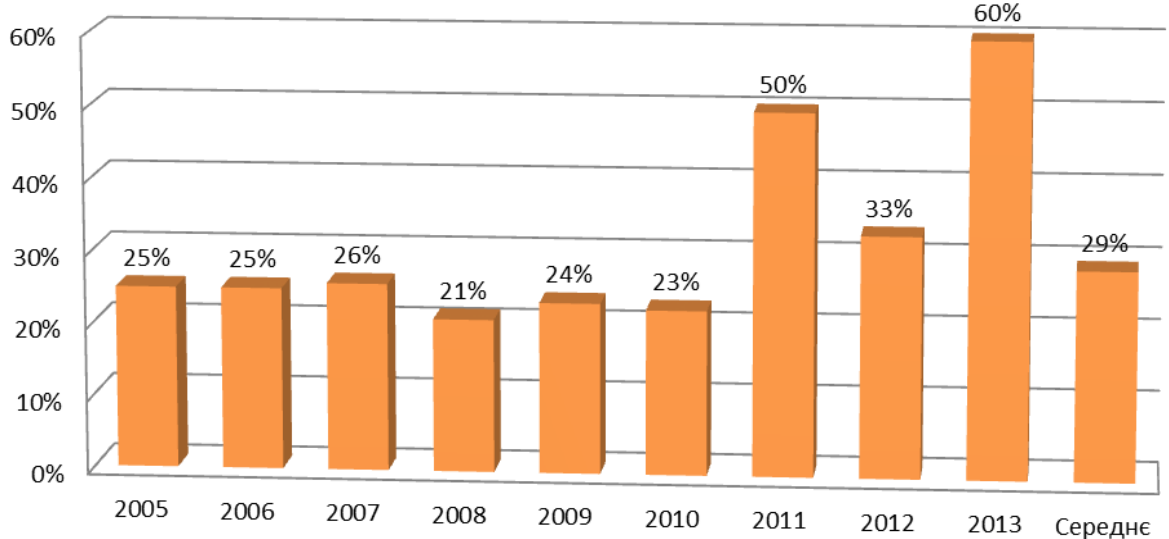


Рис. 2. Відсоток транспортних подій з вини автогальм

Необхідно зазначити, що однією із основних причин несправностей колісних пар пасажирських вагонів є незадовільна робота гальмового обладнання, що негативно впливає на поверхню кочення коліс. Найбільш розповсюдженні

несправності колісних пар, які залежать в основному від справної роботи гальм — це повзун, нерівномірний прокат, навар, кільцеві виробки, круговий наплив металу, термотріщини, вищербини (рис. 3) [4, 7].

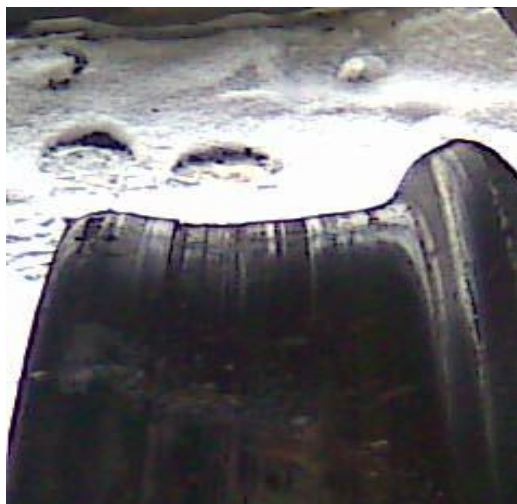




Рис. 3. Дефекти на поверхні кочення колісних пар, які виникають через несправність гальмівного обладнання

Можна виділити також пошкодження поверхні кочення колісних пар, які виникають через перезарядження гальмівної магістралі та завищений тиск в гальмових циліндрах при гальмуванні пасажирського поїзда (рис. 4).



Рис. 4. Утворення наварів на поверхнях кочення колісних пар пасажирського вагона через перезарядку гальмівної магістралі

Проаналізувавши позапланової заміни колісних пар за останні 10 років (рис. 5) можна

Рухомий склад залізниць

побачити, що через вплив автогальм у пасажирському господарстві замінюють від 29% до 42% і це значення продовжує зростати [8].

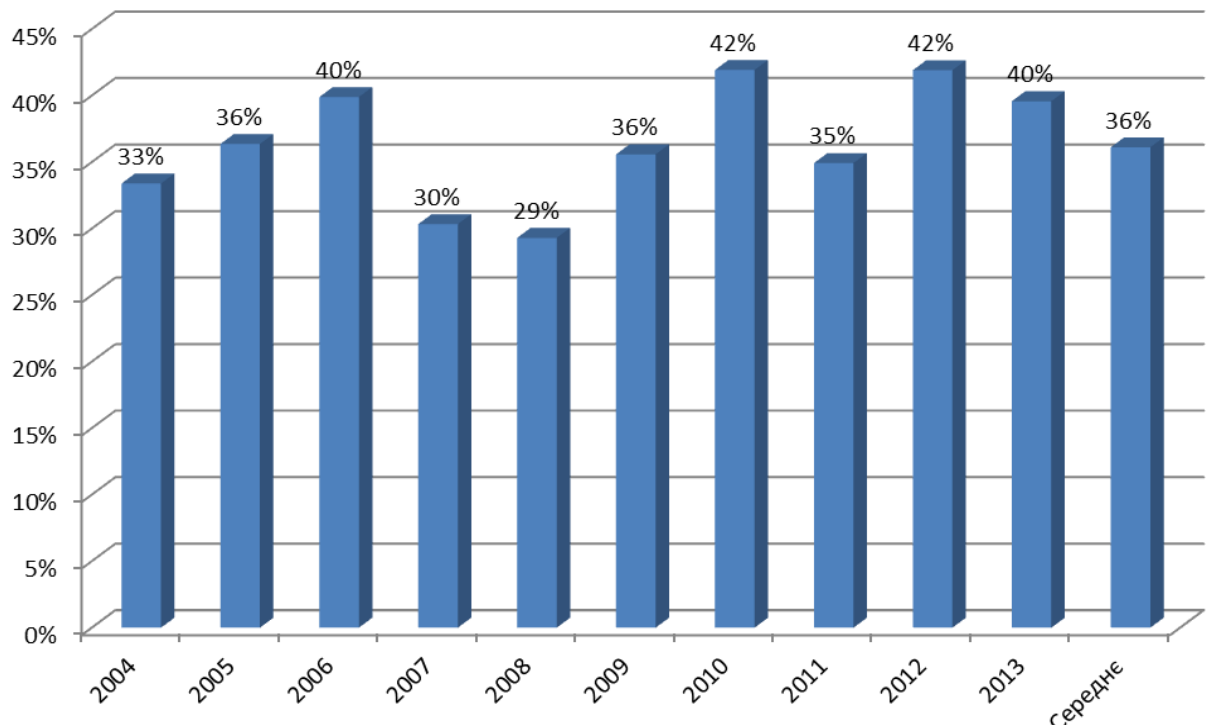


Рис. 5. Відсоткове відношення позапланової заміни несправних колісних пар із впливом автогальм до загальної їх кількості

Електропневматичні гальма забезпечують швидкість і рівномірність спрацьовування, відмінну керованість та забезпечують встановлений гальмівний шлях на швидкостях руху до 160 км/год. Отже від їх надійної роботи залежить безпека руху

поїздів, особливо при високих швидкостях [6, 10].

Аналіз роботи електропневматичних гальм (рис. 6.) показує що незважаючи на зменшення об'ємів перевезень кількість їх відмов залишається значною.

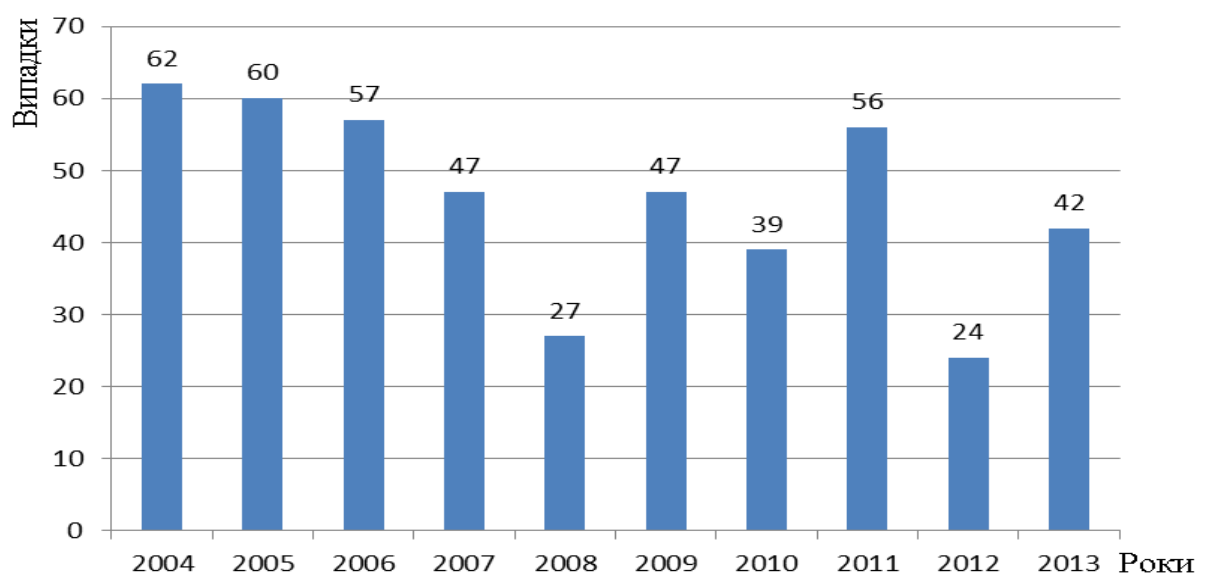


Рис. 6. Кількість відмов електропневматичних гальм

Для зменшення кількості транспортних подій на залізничному транспорті в результаті відмов гальмового обладнання пасажирських вагонів необхідно розробити і створити експертно-інформаційні технології, що поєднують в собі функції оцінки технічного стану гальмової системи поїзда і передачі інформації в системи управління. Вони дозволяють приймати рішення про можливість подальшої експлуатації пасажирського поїзда [5, 7].

Основними критеріями ефективності інформаційних систем є достовірність і оперативність отримання інформації про технічний стан гальмової системи пасажирського вагона, швидкість обробки і передачі експертної інформації, ступінь автономності та захищеності від природних і техногенних впливів, узгодженість роботи інформаційної системи з процесом перевезення пасажирів.

Структура пасажирського вагона характеризується структурними кількісними параметрами, які представляють різні фізичні величини. Значення цих параметрів можуть бути початковими, допустимими і граничними. У процесі експлуатації структурні параметри змінюються, що призводить, як правило, до погіршення технічного стану пасажирських вагонів.

Для отримання наближеної оцінки

$$Z = \Psi(x, y_{\text{поч}}, t), \quad (1)$$

може позначати аналітичну, векторну, табличну або іншу форму подання системи передавальних функцій справної гальмової системи при діагностуванні, що відображає залежність реалізованих вихідних функцій z від вхідних змінних x , початкового значення $y_{\text{поч}}$ внутрішніх змінних і часу (напрацювання) t .

Система (1) є математичною моделлю

$$Z_i = \psi_i(x, y_{\text{поч}}, t), \quad (2)$$

які подані в тій же формі, що і передавальні функції (1).

Система (2) для фіксованого i є математичною моделлю i -несправної гальмової системи.

Система (1) і сукупність систем (2) для всіх $SiES$ утворює модель гальмової системи, що піддається діагностуванню. Часто в явному вигляді задається тільки модель справної гальмової системи, тобто залежність (1), а поведінка гальмової

стану гальмової системи виділяється сукупність прямих і непрямих ознак (діагностичних параметрів), що відображають найбільш ймовірні дефекти, які пов'язані зі зниженням працездатності та виникненням відмов [7].

Розробка і створення системи технічного діагностування базуються на вивченні процесів, що відбуваються у гальмових системах пасажирських вагонів і їх можливих відмов. Вона включає в себе побудову й аналіз математичних моделей, що представляють форматований опис гальмової системи пасажирського вагона в справному стані у вигляді детермінованих або ймовірнісних залежностей між можливими впливами на гальмові системи і його реакціями на ці впливи [2, 7].

При побудові математичних моделей x позначає m -мірний вектор, компонентами якого є значення змінних величин на вході гальмової системи, що характеризує впливи, які сприймаються нею x_1, x_2, \dots, x_m .

Аналогічно y позначає n -мірний вектор n параметрів технічного стану або внутрішніх структурних параметрів y_1, y_2, \dots, y_n , а z позначає r -мірний вектор значення r діагностичних параметрів на виході гальмової системи чи інакше кажучи вихідних функцій z_1, z_2, \dots, z_r .

Запис

справної гальмової системи. Однак, можна виділити для розгляду кінцеву множину S можливих несправностей гальмової системи. При наявності в гальмовій системі несправності $SiES, i=1, 2, \dots, S$ говорять, що вона знаходиться в i - несправному стані. Гальмова система, що знаходиться в i - несправному стані, реалізує систему передавальних функцій:

системи в i - несправних станах задається непрямо, а через безліч S можливих несправностей.

Показники динаміки зміни параметрів гальмової системи пасажирських вагонів у експлуатації знаходять за результатами вимірювань і статистичною обробкою отриманих результатів. Відхилення значення структурного параметра (стану гальмової системи) від номіналу виражається випадковою функцією

$$S(t) = V_c t^\alpha + b_l + z_i, \quad (3)$$

де V_c — показник випадкової швидкості відхилення параметра при напрацюванні $t=l$, зменшеної в 6 разів;

t — напрацювання, год;

α — показник ступеня, що характеризує кривизну реалізації на всьому діапазоні вимірювань;

b_l — показник припрацювання деталей гальмової системи;

z_i — стаціонарна випадкова функція

$$P = f(P_{gj}) \quad (j = 1, 2, k), \quad (4)$$

де P, P_{gj} — величини відповідно структурного і j -го діагностичного параметрів.

Потім за допомогою критерію щільності зв'язку — коефіцієнта r встановлюють кореляційну залежність між j -

$$\rho \equiv \frac{\bar{r}}{\partial f / \partial P_{gj}}, \quad (j = 1, 2, \dots, l), \quad (5)$$

де $\partial f / \partial P_{gj}$ — власна похідна функція в точці, ордината якої дорівнює допустимому значенню параметра;

l - число діагностичних параметрів, що залишилися для дослідження.

Великі значення узагальнюючого показника зв'язку служать на користь вибору даного діагностичного параметра.

Для зменшення кількості транспортних подій на залізничному транспорті фахівцями кафедри «Вагони» Української державної академії залізничного транспорту розроблено технологію, яка дає змогу здійснювати контроль за гальмовою системою пасажирських вагонів у процесі експлуатації.

Висновки.

Своєчасне виявлення несправностей гальмівного обладнання забезпечує безпеку руху поїздів зі встановленими швидкостями. Існуючий стан гальмівного обладнання вимагає впровадження систем контролю їх дії, особливо роботи електропневматичних гальм. Вчасне виявлення таких

відхилення параметра з нульовим математичним очікуванням.

При виборі діагностичних параметрів гальмової системи пасажирських вагонів у результаті аналізу статистичних рядів значень структурних і діагностичних параметрів знаходять за кожним структурним параметром функцію його математичного очікування:

м діагностичним параметром і структурним.

Діагностичні параметри, для яких r має невеликі значення, виключають.

Для решти розраховують значення узагальнюючого показника зв'язку

несправностей як завищення тиску в гальмівному циліндрі та гальмівній магістралі, відмова електропневматичних гальм істотно покращить безпеку руху та забезпечить зменшення пошкоджень колісних пар.

Також однією з найважливіших умов забезпечення безпеки залізничних перевезень є широке впровадження засобів технічного діагностування гальмової системи пасажирських вагонів на шляху прямування та підготовки їх до рейсу. Впровадження засобів технічного діагностування дасть змогу підвищити інтенсивність використання пасажирських вагонів, полегшити важку і небезпечну працю працівникам, які здійснюють контроль за процесом експлуатації вагонів. Крім того, слід враховувати що надійність дій людини без застосування технічних засобів визначається ймовірністю помилки 10^{-3} , а при їх застосуванні ймовірність пропуску несправностей зменшується до 10^{-8} .

Список використаних джерел

1. Аналіз стану безпеки руху поїздів на залізницях України за 2013 рік [Текст] / Головне управління вагонного господарства. — Київ : 2013. — 24 с.
2. Асадченко, В. Р. Автоматические тормоза подвижного состава [Текст] : учеб. пособие / В. Р. Асадченко. — М. : Маршрут, 2006. — 392 с.
3. Бабаєв, А. М. Принцип дії, розрахунки та основи експлуатації гальм рухомого складу залізниць [Текст] : навч. посіб. / А. М. Бабаєв, Д. В. Дмитрієв. — К. : ДЕДУТ, 2007. —

176 с.

4. Борзилов, І. Д. Удосконалення технології технічного обслуговування та ремонту вагонів засобами технічної діагностики [Текст] : навч. посіб. / І. Д. Борзилов. — Харків : 2003. Ч. 1. — 77 с.

5. Внедрение электронно-пневматических тормозов на железных дорогах США [Текст] / Журнал “Железные дороги мира“. — М., 2006, №5. С. 71-74.

6. Галай, Э. И. Повышение эффективности электропневматических тормозов поезда [Текст] : учеб. пособие / Э. И. Галай. — Гомель : БелГУТ, —182 с.

7. Криворудченко, В. Ф. Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта [Текст] : учеб. пособие / В. Ф. Криворудченко, Р. А. Ахмеджанов. / Под ред. В. Ф. Криворудченко. — М. : Маршрут, 2005. — 436 с.

8. Мартинов, І. Е Підвищення готовності пасажирських вагонів на основі бортової системи контролю колісних пар [Текст] / І. Е. Мартинов, В. В. Бондаренко, І. Д. Скуріхін // Зб. наук.праць. – Х., УкрДАЗТ, 2011. — Вип. 123. С. 55-62.

9. Патент №2243913 Российской федерации. Электропневматический тормоз железнодорожных подвижных единиц [Текст] / Н. В. Маликов, А. В. Казаринов, Д. Н. Маликов, Д. С. Пасерба, Е. Н. Семочкин ; опубл. 10.01.2005.

10. Патент №2392141 Российской федерации. Способ действия электропневматического тормоза и устройство для его реализации [Текст] / Н. В. Маликов ; опубл. 20.06.2010.

Рецензент д-р техн. наук професор В.Г. Маслієв

Равлюк Василь Григорович к. т. н., старший викладач кафедра вагонів Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: ravvg@ukr.net.

Дерев'янчук Ярослав Володимирович асистент кафедра вагонів Українська державна академія залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-35. E-mail: slavvad2@rambler.ru.

Ravlyuk Vassyl G. candidate of technical sciences, a senior professor of chair of cars of Ukrainian state Academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: ravvg@ukr.net.

Derevyanchuk Yaroslav V. assistant of cars of Ukrainian state Academy of railway transport. Tel.: (057) 730-10-35. E-mail: slavvad2@rambler.ru.

Стаття поступила 21.04.2015

УДК 656.212.5:656.25

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ АСПЕКТІВ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ВИНИКНЕННЯ ПОРУШЕНЬ БЕЗПЕКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОРТУВАЛЬНОЇ ГІРКИ

К-т техн. наук С. О. Бантюкова

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ АСПЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НАРУШЕНИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОРТИРОВОЧНОЙ ГОРКИ

К-т техн. наук С. А. Бантюкова

ANALYSIS OF BASIC ASPECTS OF MANAGEMENT RISKS OF SAFETY FUNCTIONING VIOLATIONS OF MARSHALLING YARD

Ph.D S. O. Bantyukova

Проведено аналіз основних аспектів управління ризиками на сортувальній гірці. Зроблено висновок, що у зв'язку з відсутністю загальної математичної моделі сортувального процесу та чіткого алгоритму моніторингу та управління ризиками,

Рухомий склад залізниць

управління ризиками виникнення порушень безпеки проводиться за рахунок обліку та регулювання окремих складових частин технологічного процесу сортувальних гірок. Запропоновано інформаційно-логічну структуру, що забезпечує підтримку та виконання основних дій, спрямованих на виявлення, оцінку і управління ризиками на сортувальній гірці.

Ключові слова: управління ризиком, безпека функціонування, сортувальна гірка, інформаційно-логічна структура.

Проведен анализ основных аспектов управления рисками на сортировочной горке. Сделан вывод, что в связи с отсутствием общей математической модели сортировочного процесса и четкого алгоритма мониторинга и управления рисками, управление рисками возникновения нарушений безопасности производится за счет учета и регулирования отдельных составных частей технологического процесса сортировочных горок. Предложено информационно-логическую структуру, которая обеспечивает поддержку и выполнение основных действий, направленных на выявление, оценку и управления рисками на сортировочной горке.

Ключевые слова: управление риском, безопасность функционирования, сортировочная горка, информационно-логическая структура.

In connection with a specific and intensity of work of marshalling yard, there are substantially more safety functioning violations on it, than on other objects of a transport process. One of the stages of decision of question of increase of safety and efficiency of sorting process there is a realization of analysis of basic aspects of management risks on a marshalling yard. On the basis of the analysis conducted by author a conclusion is done, that in connection with absence of general mathematical model of sorting process and clear algorithm of risks monitoring and management, management of origin of safety functioning violations is conducted due to account and adjusting of separate component parts of technological process of marshalling yards. In the conditions of objective existence of risks and related to them damages there is a requirement in the certain mechanism of acceptance of the administrative decisions sent to development of risks control system, that will provide efficiency and reliability of functioning of marshalling yards. One of criteria of the quality functioning of marshalling yard an exposure and estimation of risks, that will allow to determine directions of the use of administrative, financial, technical resources must become. An information-logical structure, which provides support and implementation of basic actions, directed on an exposure, estimation and management risks on a marshalling yard is offered in the article.

Keywords: risk management, safety functioning, marshalling yard, information-logical structure.

Вступ. Стабільна робота транспорту завжди була справою надзвичайної політичної та економічної важливості. Безпека руху на залізничному транспорті в цілому та на сортувальних гірках зокрема, залежить від великої кількості факторів. Існує необхідність більш широкого застосування сучасних методів дослідження для вивчення впливу несприятливих факторів, розробки оптимальних критеріїв оцінки рівня безпеки функціонування залізничного транспорту для підвищення ефективності процесу залізничних перевезень.

Вважається загальноприйнятим, що абсолютної безпеки взагалі, а тим більше на

транспорті, не існує, тому можна говорити тільки про відносну безпеку або про відповідний рівень безпеки [1, 2]. Це впливає з того, що надзвичайні обставини виникають за законами випадковостей і вони завжди будуть присутні на транспорті при наявності певних умов і обставин, при яких вони відбуваються.

Одним з важливих об'єктів транспортного процесу є сортувальна гірка сортувальної станції, що забезпечує процес розформування-формування залізничних потягів, що відноситься до відповідальних технологічних процесів. У зв'язку із специфікою та інтенсивністю роботи

сортувальної гірки, на ній відбувається істотно більше порушень безпеки функціонування, чим на інших об'єктах транспортного процесу різного ступеня складності. Назріла необхідність у розробці теоретичних, практичних і методичних питань, що забезпечують системний підхід до вирішення сукупності проблем забезпечення безпеки функціонування сортувальних гірок на залізничному транспорті.

Постановка проблеми. Приймаючи до уваги вищезазначене, актуальними являються дослідження, які спрямовані на підвищення безпеки руху та ефективності процесу залізничних перевезень. Одним з етапів вирішення цього питання є проведення аналізу основних аспектів управління ризиками в системі залізничних перевезень і на сортувальній гірці зокрема.

Аналіз досліджень та публікацій. Аналіз опублікованих робіт свідчить про те, що питання управління ризиками як підприємств так і технічних систем в тому або іншому ступені одержало відбиття в порівняно невеликій кількості наукових праць. Серед дослідників-теоретиків, що внесли внесок у розвиток теорії ризику, можна виділити таких вчених, як А. П. Альгін, Дж. М. Кейнс, А. Маршалл, О. Моргенштейн, Ф. Найт, Дж. Нейман, Б. А. Райзберг, В. В. Черкасов.

А. Маршаллом одним з перших було розглянуто проблеми виникнення економічних ризиків, його праці поклали початок неокласичної теорії ризику [3]. Дж. М. Кейнс увів у науку поняття «схильність до ризику», характеризуючи інвестиційні та підприємницькі ризики, одним з перших приступив до класифікації ризиків [4].

У роботі Ф. Найта «Ризик, невизначеність і прибуток» [5] вперше була висловлена думка про ризик як кількісній мері невизначеності. У працях О. Моргенштейна та Дж. Неймана також були розроблені питання теорії ризику, що відбивають взаємозв'язок понять «невизначеність» і «ризик», відбите імовірносно-математичне трактування ризику.

Питанням ризику в управлінській діяльності, у тому числі, організаційно-

методичним основам зниження управлінських ризиків присвячена монографія В. В. Черкасова [6].

У розвиток прикладних концепцій ризику свій внесок внесли Т. Боллерслев, К. Гіаннопоулос, М. В. Грачова, Г. Гуптон, П. Зангарі, В. Є. Кузнецов, М. А. Рогов, В. О. Чернов, Г. В. Чернова, Р. Енглє.

Питанням ризику та надійності в технічних системах присвячена робота Э. Дж. Хенли і Х. Кумамото «Надійність технічних систем і оцінка ризику» [7].

Аналіз опублікованих робіт в області управління ризиком на залізничному транспорті показує, що більшість джерел присвячена аналізу окремо взятих питань ризику, у зв'язку із чим залишається цілий ряд невирішених питань, пов'язаних з розробкою концепції, методів і способів управління ризиками.

Визначення мети та задачі дослідження. Метою даного дослідження є проведення аналізу існуючих методів управління ризиками виникнення порушень безпеки на сортувальній гірці, виділення їх недоліків та обмежень. Задачею дослідження є формування інформаційно-логічної структури управління ризиками на сортувальній гірці.

Основна частина дослідження. Останнім часом особлива увага стала приділятися становленню нової науки, що називається ризикологія. Ризикологія своїм народженням зобов'язана тим глобальним змінам, які переживає людство в цей час. Виникнення ризикології пов'язане з величезною потребою аналізу, діагностування, прогнозування, програмування й планування ризиків як у виробництві, так і в звичайному житті. Особливу роль ризикологія грає в областях діяльності пов'язаних з організацією, побудовою та функціонуванням систем безпеки об'єктів транспортної галузі.

Існує ряд трактувань поняття «ризик». Наприклад, ризик у страховій діяльності використовується для позначення предмета страхування (повітряного судна або життя пасажирів), страхової суми (збитку в грошовому вираженні) або ж як збірний термін для позначення небажаних або невизначених подій [8]. Економісти і

статисти розуміють ризик як міру імовірності наслідків, які можуть виявитися в майбутньому [9]. У психологічному словнику ризик трактується як дія, спрямована на привабливу мету, досягнення якої сполучено з елементами небезпеки, погрозою втрати, неуспіху [10]. Можливе визначення ризику як характеристики діяльності, що свідчить про невизначеність її результату та можливих несприятливих наслідків у випадку неуспіху, або як міри неблагополуччя при неуспіху в діяльності, обумовленої сполученням імовірності та величини несприятливих наслідків [6]. У [7] під ризиком розуміється очікувана частота або імовірність виникнення небезпек певного класу, або ж розмір можливого збитку (втрат, шкоди) від небажаної події, або ж деяку комбінацію цих величин. У [11] під терміном «ризик» розуміють векторну, тобто багатокомпонентну величину, що характеризується збитком від впливу того або іншого небезпечного фактора, імовірністю виникнення фактора, що розглядається та невизначеністю у величинах як збитку, так і імовірності. У [12] ризик розглядається як імовірність людських і матеріальних втрат або пошкоджень. Згідно з [13] ризик транспортної події визначається, як імовірність виникнення потенційно можливої транспортної події та пов'язаних з нею збитків під час виконання поїзної чи маневрової роботи. У [14] під ризиком розуміється кількісна міра небезпеки, що враховує імовірність виникнення негативних наслідків від здійснення господарської діяльності та можливий розмір втрат від них.

Загальним у всіх наведених визначеннях є те, що ризик включає імовірність появи небажаної події або виникнення несприятливого стану з

врахуванням потенційних збитків. Відповідно до сучасних поглядів ризик звичайно розуміється як імовірнісна міра виникнення небезпечних техногенних або природних явищ, а також характеристика розміру нанесеного при цьому соціального, економічного, екологічного та іншого видів збитку і шкоди.

Застосування поняття ризик дозволяє переводити небезпеку в розряд вимірюваних категорій. Ризик, фактично, є міра небезпеки. Всі перераховані (або подібні) інтерпретації терміна «ризик» використовуються в цей час при аналізі небезпек і управління безпекою (ризиком) технологічних систем і процесів. Виникнення небезпечних ситуацій є результатом прояву певної сукупності факторів ризику, породжуваних тими або іншими джерелами, обставинами, умовами.

Останнім часом з'явилося розуміння того, що ризиками можливо і необхідно управляти, тобто виникла необхідність у створенні системи оцінки та управління ризиками.

Для успішного управління ризиками необхідно їх упорядкувати за допомогою системи класифікації. Класифікація ризиків означає систематизацію множини ризиків на підставі якихось ознак і критеріїв, що дозволяє об'єднати підмножини ризиків у більш загальні поняття. Як критерії класифікації ризиків пропонується використовувати сферу та область виникнення ризику. Відповідно до цих критеріїв ризику можна підрозділити на такі (рис. 1).

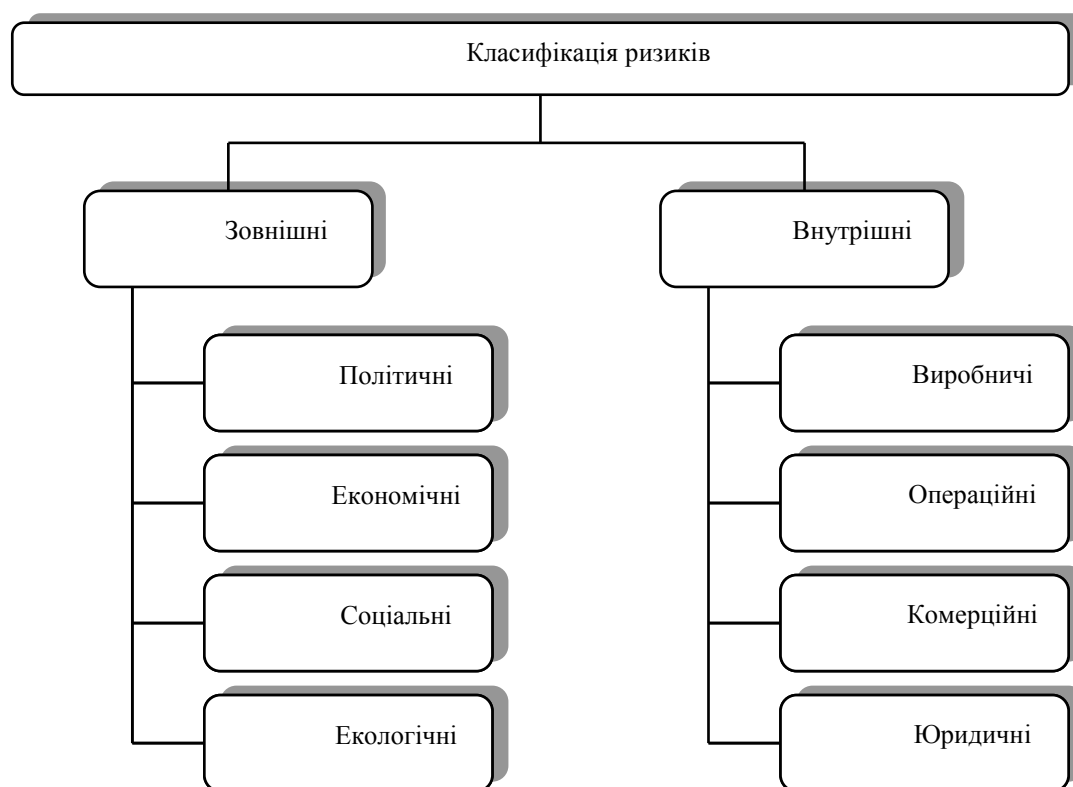


Рис. 1. Класифікація ризиків

Політичні ризики – це ризики, обумовлені зміною політичної обстановки, що впливає на діяльність підприємства.

Економічні ризики – це ризики, обумовлені несприятливими змінами в економіці країни.

Соціальні ризики – це ризики, пов'язані із процесами, що відбуваються, у суспільстві.

Екологічні ризики – це ризики, пов'язані з екологічною системою.

Виробничий ризик пов'язаний з невиконанням підприємством планів, не наданням послуг, інших видів виробничої діяльності.

Операційні ризики – це ризики, пов'язані з імовірністю управлінських, професійних помилок або зловживань, недотриманням вимог законодавства та передбачених внутрішніх правил і процедур, з недосконалістю організаційної структури і технологій, неефективністю внутрішнього контролю.

Комерційний ризик виникає в процесі реалізації послуг, у зв'язку зі зниженням попиту через зміну кон'юнктури або інших обставин, підвищенням витрат.

Юридичні ризики пов'язані зі змінами в законодавстві, невідповідності законодавств різних країн, з некоректно складеної документації.

З усіх перелічених ризиків саме операційний ризик властивий всім підприємствам, напрямкам діяльності, процесам і системам, і ефективно управління операційним ризиком завжди є одним з основних елементів системи управління ризиками.

На практиці операційним ризикам необхідно приділяти найбільшу увагу, так як основна частина операційних ризиків пов'язана з діяльністю людини.

У зв'язку з тим, що на цей час відсутня загальна математична модель сортувального процесу, управління ризиками виникнення порушень безпеки проводиться за рахунок обліку та регулювання окремих

складових частин технологічного процесу сортувальних станцій. Так, в [15] управління безпекою пропонується здійснювати за рахунок обліку продольних сил, що діють на вагони в процесі скочування з сортувальної гірки, які суттєво впливають на величини динамічних показників вагонів, розробки методів оцінки безпеки процесу регульованого скочування відчепів на сортувальних гірках, розробки методів оцінки якості інтервального та прицільного регулювання швидкості скочування відчепів, удосконалення методів техніко-експлуатаційної оцінки конструкції та технічного стану сортувальних гірок.

У [16] розроблено математичну модель скочування відчепів з гірки в якій відчеп розглядається як просторова динамічна система, що дозволяє визначити зусилля між вагонами відчепа, а також між вагонами та колією і гальмовими уповільнювачами і на цій основі здійснювати управління безпекою розпуску вагонів. Управляти безпекою пропонується на основі розроблених методів оцінки показників безпеки руху при скочуванні відчепів з гірки, що дозволяють аналізувати умови руху відчепів та попереджувати процеси викочування коліс вагонів на рейки і шини уповільнювачів під час регульованого скочування з урахуванням конструктивних особливостей та технічного стану рухомого складу, колії та уповільнювачів. Процес керування розформуванням составів також оптимізується за рахунок вибору раціональних режимів гальмування відчепів составу як в умовах експлуатації діючих сортувальних гірок та і при виконанні оцінки якості проектуємих сортувальних гірок.

У [17] запропонована теорія розрахунку основних параметрів сортувальної гірки, що заснована на використанні законів розподілу факторів, що впливають на процес розпуску составів. Запропонована теорія дозволяє розрахувати висоту, поздовжній профіль спускної частини, гальмові засоби гірки та швидкість розпуску составів з урахуванням характеру вагонопотоку, що переробляється, і

кліматичних умов, у яких працює сортувальна станція, одержати оптимальні результати за критерієм економічної ефективності, оцінити ступінь близькості до оптимальних значень параметрів існуючих сортувальних гірок і тим самим оцінити безпеку функціонування гірок.

Експлуатація та розвиток сортувальної гірки породжує ряд питань, найбільш серйозним з яких є питання оцінки потенційних ризиків, що властиві даній системі. В умовах об'єктивного існування ризиків в такій системі та пов'язаних з ними втрат виникає потреба у визначеному механізмі прийняття управлінських рішень, спрямованих на подальший розвиток такої системи, що забезпечують ефективність і надійність її функціонування з урахуванням ризику.

Отже, одним із критеріїв якісного управління сортувальною гіркою може стати виявлення та оцінка ризиків, що дозволить ранжирувати ризики за ступеню імовірності та величиною передбачених збитків для цілеспрямованого та раціонального розподілення ресурсів з метою підвищення безпеки функціонування керованої системи, тобто виробити оптимальні управляючі впливи.

Розгляд оперативних і стратегічних завдань роботи сортувальної гірки через призму ризику, дозволяє одержати досить достовірну картину стану безпеки функціонування сортувальної гірки і відповідним чином впливати на неї. Такий підхід дозволяє уникнути недоліків при використанні існуючих моделей управління при рішенні практичних завдань, тобто повніше враховувати фактори, що впливають негативно. Отже, розробка системи управління ризиками у системі управління сортувальною гіркою є актуальним питанням.

Серед учених і фахівців поки немає однозначного розуміння змісту процесу управління ризиками, відсутні єдині методичні підходи до формування системи управління ризиками. У результаті аналізу існуючої інформації можна сформулювати

поняття системи управління ризиками на сортувальній гірці. Система управління ризиками на сортувальній гірці уявляє собою інтегровану систему, яка входить у загальну систему управління сортувальною гіркою, що включає організаційні, методичні, інформаційні засоби, які направлені на виявлення, оцінку, попередження можливих ризиків, мінімізацію негативних наслідків та недопущення повторних інцидентів ризиків або досягнення величини ризиків у визначених межах.

Функціонування перспективної системи управління ризиками на сортувальній гірці може відбуватися згідно запропонованої інформаційно-логічної структури, що забезпечує підтримку та виконання основних дій, спрямованих на виявлення, оцінку і управління ризиками (рис. 2).

Для управління процесами в системі «сортувальна гірка» необхідно описати систему у формалізованому вигляді з виділенням критерію оптимізації. Така форма опису дозволить здійснити дослідження системи з погляду системного аналізу, що дозволить із більшою точністю визначити ризик появи небезпечних ситуацій при технологічному процесі розформування-формування составів та підвищити ефективність експлуатації сортувальних гірок.

Експлуатація і розвиток системи «сортувальна гірка» породжує ряд питань, найбільш серйозним з яких є питання оцінки та управління потенційними ризиками, що властиві даній системі.

В умовах об'єктивного існування ризиків і пов'язаних з ними втрат виникає потреба в певному механізмі прийняття

управлінських рішень, спрямованих на подальший розвиток такої системи, що забезпечують ефективність і надійність її функціонування з урахуванням ризиків.

Тому, одним з критеріїв якісного управління сортувальною гіркою повинно стати виявлення та оцінка ризиків, що дозволяє визначати напрямки використання управлінських, фінансових, технічних ресурсів. На даний момент сформувався декілька напрямків вирішення задачі ефективного управління безпекою розформування составів на гірках, основним з яких є застосування новітніх мікропроцесорних засобів обчислювальної техніки, що здатні вирішувати складні інформаційно-плануючі завдання в нових та існуючих комплексних системах автоматизованого управління розформуванням составів. Вказані засоби спроможні забезпечити більш високий рівень реакції на зміну ситуації, швидко її проаналізувати та обрати найбільш безпечний режим управління.

Як показує досвід експлуатації автоматизованих сортувальних гірок, що обладнані сучасними комплексними системами управління сортувальним процесом, використання мікропроцесорних засобів обчислювальної техніки дозволяє звести до мінімуму вплив людини на хід вказаного процесу. Тим не менше цей вплив не виключається.

Отже, удосконалення існуючих або розробка нових методів управління ризиками виникнення порушень безпеки розформування составів на сортувальній гірці є однією з основних науково-прикладних задач галузі.

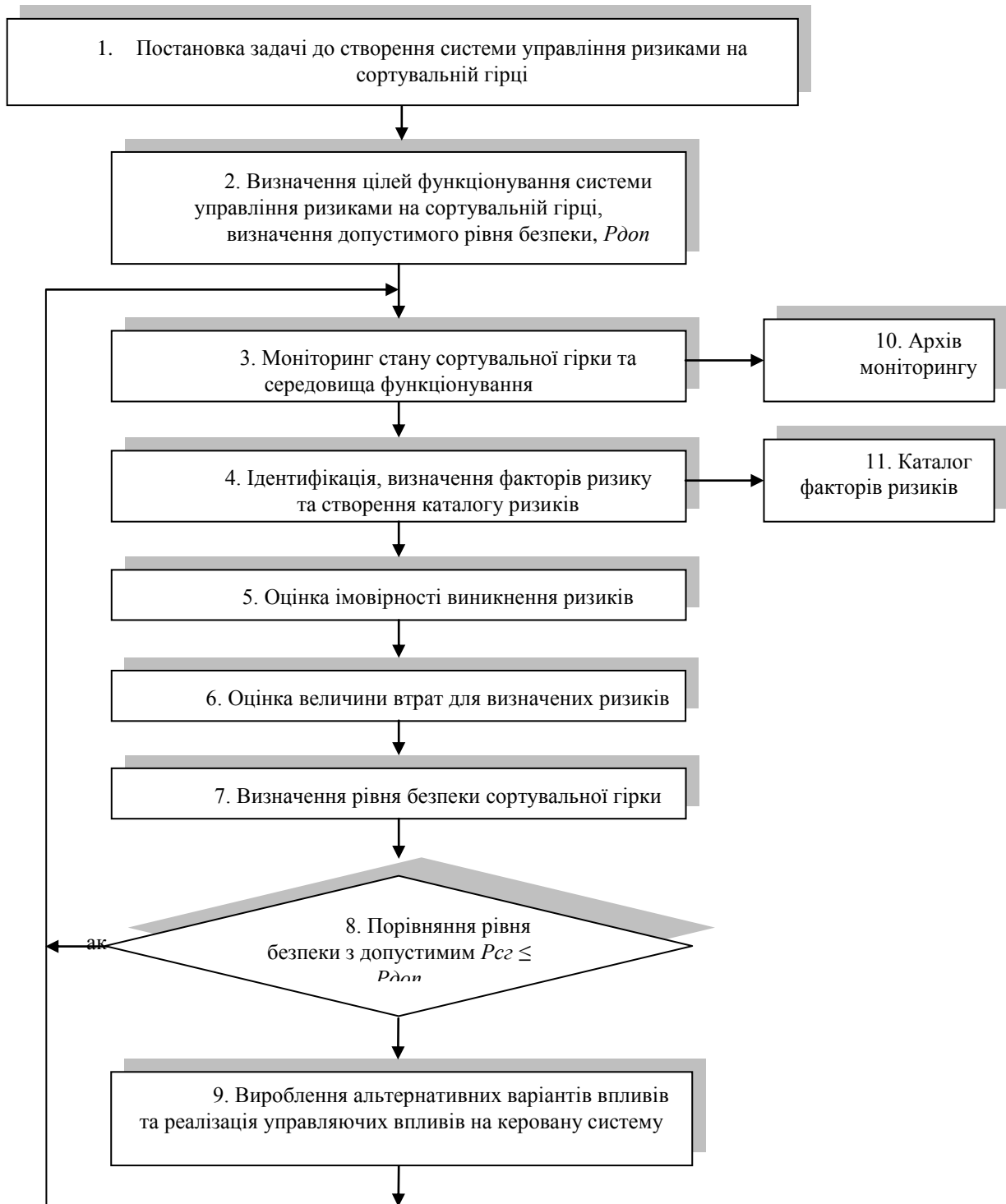


Рис. 2. Інформаційно-логічна структура управління ризиками на сортувальній гірці

Висновки з дослідження. На основі проведеного аналізу існуючих методів управління ризиками виникнення порушень безпеки функціонування сортувальної гірки можна зробити висновок, що у зв'язку з відсутністю загальної математичної моделі

сортувального процесу та чіткого алгоритму моніторингу та управління ризиками, управління ризиками виникнення порушень безпеки проводиться за рахунок обліку та регулювання окремих складових частин технологічного процесу сортувальних гірок.

Функціонування перспективної системи забезпечує підтримку та виконання основних управління ризиками на сортувальній гірці дій, спрямованих на виявлення, оцінку і може відбуватися згідно запропонованої управління ризиками. інформаційно-логічної структури, що

Список використаних джерел

1. Ветошкин, А. Г. Надежность технических систем и техногенный риск [Текст] / А. Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 248 с.
2. Радаев, Н. Н. Элементы теории риска эксплуатации потенциально опасных объектов [Текст] / Н. Н. Радаев. – М.: РВСН, 2000. – 323 с.
3. Marshall, A. Principles of Economics [Текст] / A. Marshall. – London: Macmillan and Co., Ltd., 1920. – 71 p.
4. Keynes, J. The Economic Consequences of the Peace [Текст] / J. Keynes. – London: Macmillan, 1920. – 279 p.
5. Knight, F. Risk, Uncertainty, and Profit [Текст] / Frank H. Knight. – Boston, MA: Hart, Schaffner & Marx; Houghton Mifflin Co., 1921. – 381 p.
6. Черкасов, В. В. Проблемы риска в управленческой деятельности [Текст] / В. В. Черкасов. – Москва : Изд-во Рефл-бук, 2002. – 320 с.
7. Henley, E. Reliability engineering and risk assessment [Текст] / E. J. Henley, Н. Kumamoto // Prentice-Hall, 1981. – 568 p.
8. Юргенс, И. Ю. Риск-менеджмент [Текст]: учебник / И. Ю. Юргенс. – М. : Дашков и К, 2003. – 512 с.
9. Романов В. С. Понятие рисков и их классификация как основной элемент теории рисков // Инвестиции в России. — 2000г. — № 12, с. 41-43
10. Психологический словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : \www/ URL : http://glossword.info/index.php/term/.6ea3ac6f59585492707154a5_5ea9a65c596155b062a2a45656936aa95e9fac71959c7158a45e5b926e576aa2.shtml.
11. Костиков, В. А. Надежность технических систем и техногенные риски [Текст] : учеб. пособие для студ. спец. 280102 / В. А. Костиков. – М. : МГТУ ГА, 2008. – 136 с.
12. Кузьминова, Н. В. Курс лекций по дисциплине «Управление рисками» [Текст] / Н. В. Кузьминова, Н. В. Моргунова, Н. М. Филимонова. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 76 с.
13. Безопасность движения на железнодорожном транспорте [Текст]: Методические указания для студентов и слушателей курсов повышения квалификации. – Новосибирск, 2002. – 50 с.
14. Евстафьев, И. Тотальный риск-менеджмент [Текст] / И. Евстафьев. – М. : Эксмо, 2008. – 208 с.
15. Мямлин, С. В. Динамика вагонов в отцепе при скатывании с сортировочной горки [Текст] / С. В. Мямлин, Д. Н. Козаченко // 36. наук. праць Донецький інститут залізничного транспорту Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Донецьк:– Вид-во ДонІЗТ, 2009. – Вип. 17 С. 150–155.
16. Козаченко, Д. М. Розвиток теоретичних основ оцінки техніко-експлуатаційної ефективності та безпеки функціонування сортувальних гірок [Текст] : дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.20: «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / Козаченко Дмитро Миколайович – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2011. – 297 с.
17. Муха, Ю. А. Имитационное моделирование процесса скатывания отцепов при выполнении горочных расчетов [Текст] / Ю. А. Муха, А. А. Муратов // Механизация и

Рухомий склад залізниць

автоматизация сортировочного процесса на станциях : межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск : ДИИТ, 1990. – С. 11 – 20.

Рецензент д-р техн. наук, професор В. І. Мойсеєнко

Бантюкова Світлана Олександрівна, канд. техн. наук, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та систем управління Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-40. E-mail: b-sv-a@mail.ru

Bantyukova Svitlana Oleksandrivna, Ph.D, department of Computing technics and control systems Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-40. E-mail: b-sv-a@mail.ru

Стаття поступила 25.04.2015