



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 181

Харків 2018

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті:
http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті
<http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <http://znp.kart.edu.ua>

Реферативна база

"Наукова періодика України": <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 9 від 27 листопада 2018 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друківаних (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. №1328 (додаток 8)).

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ХНТУСГ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., проф. (НУ Львівська політехніка)
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ватуля Г. Л., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ, м. Чернігів)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Залізничний транспорт (273)

Ковтун П. В., Дубровская Т. А. Аналіз впливу непогашеного прискорення на швидкість руху пасажирських поїздів 6

Крашенінін О. С., Клименко О. В., Яковлев С. С., Шапатіна О. О. Обґрунтування маневреності ремонтного господарства локомотивного депо 15

Транспортні технології (275)

Супрун О. Д., Семенов О. І., Семенов Ю. О., Кузьмін С. С., Домарацький В. Р. Шляхи оптимізації періодичності технічного обслуговування обладнання систем електричної тяги 24

Акімов О. І., Панченко В. В., Заїка Л. В., Панютін О. М. Розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху 43

Мартинів І. Е., Меркулов В. С., Бізюк І. Г., Петрова Р. В. Автоматизація процесу формування штатного розпису в регіоні залізниці 50

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин 58

Коробко О. О., Вировой В. М., Суханов В. Г., Загорчємний Ю. О. Стійкість бетонів при періодичних зовнішніх впливах 65

Волкова В. Е. Совершенствование динамических моделей стержневых систем 74

Мозговий А. О. Імовірнісна оцінка надійності гравітаційних стоянів на скельовій та нескельовій основах за критерієм стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду 81

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 656.072

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕПОГАШЕННОГО УСКОРЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

Канд. техн. наук П. В. Ковтун, старш. преп. Т. А. Дубровская

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕПОГАШЕНОГО ПРИСКОРЕННЯ НА ШВИДКІСТЬ РУХУ ПАСАЖИРСЬКИХ ПОЇЗДІВ

Канд. техн. наук П. В. Ковтун, старш. викл. Т. О. Дубровська

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF AN ABSOLUTE ACCELERATION ON THE SPEED OF MOVEMENT OF PASSENGER TRAINS

PhD (Tech.) P. V. Kovtun, senior lecturer T. A. Dubrovskaya

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156307>

Повышение скоростей движения на существующих линиях при минимальных затратах – одна из основных задач на сегодняшний день на Белорусской железной дороге. Ближайшая скоростная перспектива – 160 км/ч. Зачастую существующие кривые малых радиусов сдерживают увеличение скоростей движения пассажирских поездов. Одним из основных критериев определения скорости движения в кривых является непогашенное ускорение – $a_{нп}$, м/с. Для пассажирских поездов $a_{нп}$ принято равным 0,7 м/с². Этот критерий является характеристикой плавности хода и условием комфортабельности езды. Поднять скорость в кривых можно несколькими способами, например, увеличив возвышение наружного рельса, повысив норму непогашенного ускорения и т. д. Первый вариант требует удлинения переходных кривых и переукладки пути, что дорого и не всегда возможно осуществить. В частности, это трудно сделать на линиях с интенсивными грузоперевозками. Вторым вариантом решения проблемы имеет гораздо больше возможностей быть реализованным. В статье рассмотрен один из вариантов увеличения скорости прохождения кривых за счет увеличения допустимого предела непогашенного ускорения до 0,9 м/с². Экспериментальными исследованиями установлено, что длительное и повторное воздействие непогашенного центробежного ускорения величиной до 0,9 м/с² включительно большинство людей переносит удовлетворительно, при этом скорости движения пассажирских поездов можно поднять на 10-20 км/ч в зависимости от радиуса криволинейного участка пути.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, повышение скорости, непогашенное ускорение, возвышение наружного рельса, круговые кривые, реконструкция.

Підвищення швидкостей руху на наявних лініях при мінімальних витратах – одне з нагальних завдань на Білоруській залізниці. Найближча швидкісна перспектива – 160 км/год. Найчастіше наявні криві малих радіусів стримують збільшення швидкості пасажирських поїздів. Одним з основних критеріїв визначення швидкості руху в кривих є непогашене прискорення – $a_{нп}$, м/с. Для пасажирських поїздів $a_{нп}$ обирається 0,7 м/с². Цей критерій є характеристикою плавності ходу й умовою комфортабельності їзди. Підняти швидкість у

кривих можна двома способами: збільшити піднесення зовнішньої рейки або підвищити норму непогашеного прискорення. Перший варіант вимагає подовження перехідних кривих і переукладання колії, що дорого й не завжди можливо здійснити. Це важко зробити на лініях з інтенсивними вантажоперевезеннями. Другий варіант вирішення проблеми має набагато більше можливостей бути реалізованим. У статті розглянуто один із варіантів збільшення швидкості проходження кривих завдяки підвищенню допустимої межі непогашеного прискорення до $0,9 \text{ м/с}^2$. Експериментальними дослідженнями встановлено, що тривала та повторна дія непогашеного відцентрового прискорення величиною до $0,9 \text{ м/с}^2$ включно більшість людей переносить задовільно, при цьому швидкості руху пасажирських поїздів можна збільшити на 10-20 км/год залежно від радіуса.

Ключові слова: залізничний транспорт, підвищення швидкості, непогашене прискорення, піднесення зовнішньої рейки, кругові криві, реконструкція.

Increasing the speed of traffic on existing lines with minimal costs is one of the main tasks that exist today on the Belarusian Railways. The nearest high-speed prospect is 160 km/h. Often the existing curves of small radii restrain the increase in the speed of passenger trains. As one of the main criteria for determining the speed of motion in the curves is the unrestricted acceleration – a_{aa} , m/s. For passenger trains a_{aa} is assumed equal to 0.7 м/с^2 . This criterion is a characteristic of the smooth running and the condition of riding comfort. You can increase the speed in curves in several ways: for example, by increasing the elevation of the outer rail, by raising the rate of unprecedented acceleration, etc. The first option requires lengthening the transition curves and re-laying the track, which is expensive and not always possible. In particular, it is difficult to do on lines with intensive cargo transportation. The second solution to the problem has much more opportunities to be realized. The article considers one of the options for increasing the speed of passing curves by increasing the permissible limit of the unrestricted acceleration to 0.9 м/с^2 . Experimental studies have established that the long-term and repeated impact of an unprecedented centrifugal acceleration up to 0.9 м/с^2 inclusive, most people tolerate satisfactorily, while the speed of passenger trains can be increased by 10-20 km/h depending on from the radius of the curvilinear section of the path. Consequently, the rate of passage of existing curves will change upwards with a minimum investment. In this case, a change in the magnitude of the outstanding acceleration in a large direction should not be accompanied by the deterioration of the passengers. If this condition is met, there is an adjustment of the scientific and technical documentation existing on the Belarusian Railways.

Keywords: railway transport, speed increase, outstanding acceleration, elevation of the outer rail, circular curves, reconstruction.

Введение. Максимальная скорость движения поезда в кривой зависит от центробежных сил во взаимодействии подвижного состава и пути, которые в свою очередь определяют устойчивость подвижного состава против опрокидывания, поперечную нагрузку на путь, уровень комфорта для пассажиров и сохранность груза. Первые два критерия непосредственно относятся к безопасности движения поездов, третий и четвертый – к качеству пассажирских и грузовых перевозок.

Для нейтрализации центробежной силы в кривых наружный рельс укладывают с некоторым возвышением относительно внутреннего.

Центробежная сила, действующая в кривой, за счет возвышения наружного рельса может быть погашена полностью, частично или даже чрезмерно (при этом результирующая сила действует в сторону внутреннего рельса). На практике для таких случаев в зависимости от степени компенсации центробежной силы

используют понятия достаточного, недостаточного и избыточного возвышения.

Зная о воздействии центробежной силы, учитывая накопленный опыт, устанавливаются допустимые значения на геометрические параметры пути, в частности, на максимально допустимую величину возвышения наружного рельса в кривых и предельно допустимое значение непогашенного ускорения, при которых обеспечиваются достаточные уровень комфорта для пассажиров и сохранность грузов.

Исходя из этого, при повышении скорости движения поездов на существующих линиях можно выбрать одно из двух решений: увеличить недостаток возвышения наружного рельса или увеличить значение непогашенного ускорения.

Анализ последних исследований и публикаций. Проблемы увеличения скорости на существующих линиях без реконструкции или при минимальном переустройстве плана линии занимались многие известные ученые: Г. М. Шахуняц [1], Н. И. Карпушенко [2], Н. Б. Курган [3], Д. Н. Курган [4], И. В. Смелянский [5], А. М. Патласов [6] и др. [9, 10].

Общие тенденции анализа последних исследований сводятся к тому, что значительное повышение скоростей движения пассажирских поездов будет носить при определенных условиях и коммерческий интерес для отрасли, так как железные дороги смогут предоставлять пассажирам конкурентоспособную по отношению к авиа- и автотранспорту услугу.

По существующим прогнозам, скоростное движение в ближайшем будущем может охватить значительно более широкий сектор пассажирских перевозок, чем высокоскоростное, так как его организация не связана со строительством новой линии, хотя и требует существенных затрат на реконструкцию.

Определение цели и задачи исследования. Проблема повышения скорости движения в кривых при существующих радиусах весьма актуальна, но имеет и свои сложности. Обеспечить не только скорости движения, одинаковый износ рельсов, но и комфортабельность и безопасность пассажиров – вот одна из основных проблема в области железнодорожных перевозок.

Целью данного исследования является повышение скоростей движения поездов на существующих линиях в круговых кривых без переустройства плана. Для достижения цели изменяется предельная величина непогашенного ускорения при движении пассажирских поездов с $0,7 \text{ м/с}^2$ до $0,9 \text{ м/с}^2$ при безусловном соблюдении требований по безопасности и комфортабельности движения и др. Основная задача данной статьи – рассмотреть возможность увеличения скоростей движения поездов на существующих железнодорожных линиях при минимальных капиталовложениях.

Основная часть. Экспериментальными исследованиями установлено, что длительное и повторное воздействие непогашенного центробежного ускорения, величиной до $0,9 \text{ м/с}^2$ включительно большинство людей переносит удовлетворительно [7]. Согласно исследованиям ВНИИЖТа, ощущения укачивания, подташнивания и головокружения у пассажиров при поперечном непогашенном ускорении $0,9 \text{ м/с}^2$ увеличиваются на 0,05 услов. ед. (с 1,62 до 1,67 услов. ед.) и находятся в допуске (рис. 1). Непогашенное центробежное ускорение, равное 1 м/с^2 , переносится удовлетворительно при немногочисленных и непродолжительных воздействиях.

Общее функциональное состояние и работоспособность локомотивных бригад при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения $0,9 \text{ м/с}^2$ находится в оптимальных пределах допуска (от 71 до 118 услов. ед.) и равняется

118 услов. ед. (рис. 2). Таким образом, увеличение непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$ не окажет существенного влияния

на организм пассажиров, но может существенно сэкономить время в пути за счет более быстрого прохождения кривых.

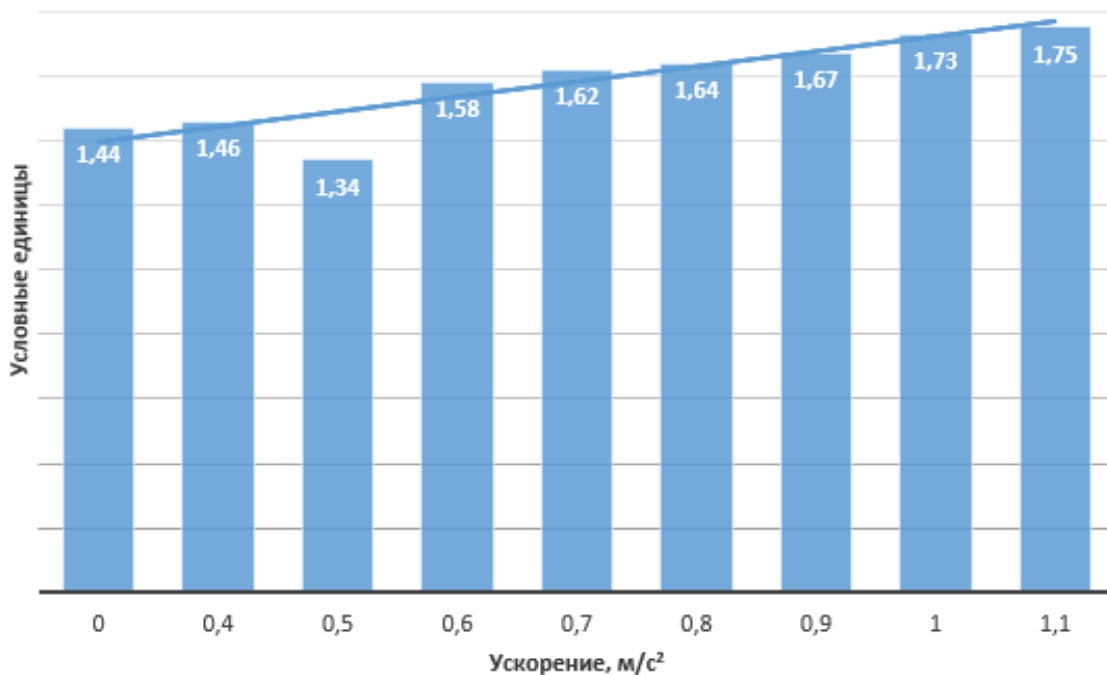


Рис. 1. Анализ общего функционального состояния у пассажиров при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения

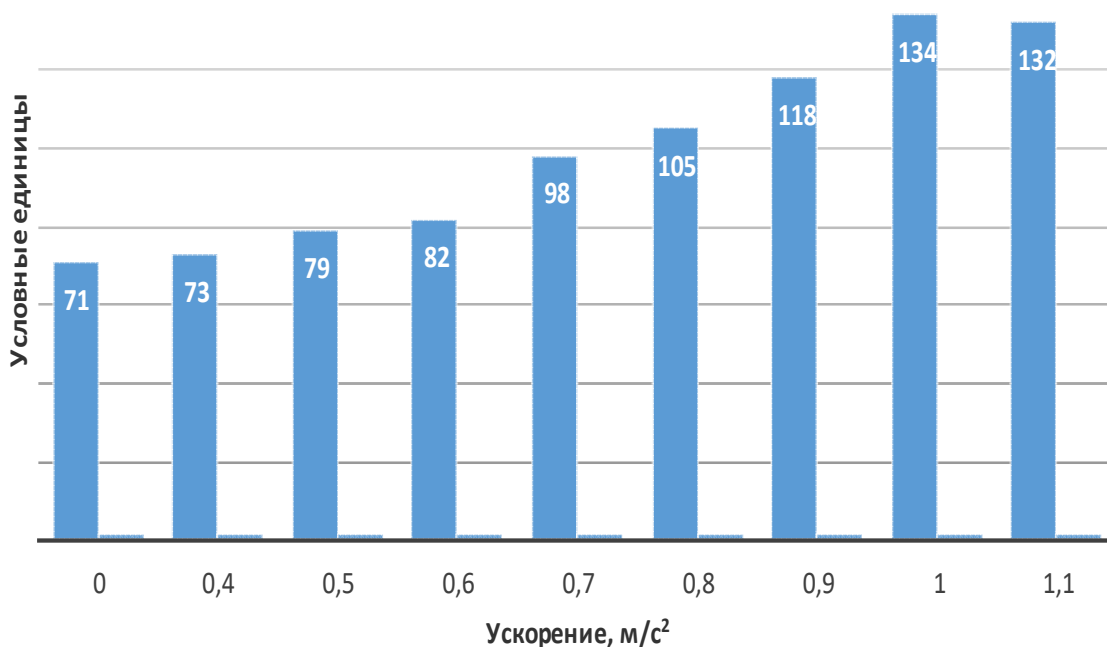


Рис. 2. Анализ общего функционального состояния и работоспособности локомотивных бригад при комплексном воздействии шума, вибрации и непогашенного ускорения

Полученные данные позволяют выполнять расчеты при непогашенном ускорении, равном $0,9 \text{ м/с}^2$, и проанализировать влияние увеличения непогашенного ускорения на скорости прохождения пассажирским поездом кривых различных радиусов.

Исходя из вышесказанного, необходимо рассмотреть, как влияет изменение величины непогашенного ускорения в кривых до $0,9 \text{ м/с}^2$ на скорость прохождения и радиус кривой.

Согласно СТП [8], непогашенное ускорение в кривых определяется по формуле

$$a_{\text{нп}} = \frac{v_{\text{max}}^2}{3,6R} - \frac{g}{S} h, \quad (1)$$

где v_{max} – максимальная скорость движения по данной кривой, км/ч;

R – радиус кривой, м;

g – ускорение свободного падения ($9,81$), м/с^2 ;

S – ширина между осями рельсов (1600), мм;

h – возвышение наружного рельса, мм.

Тогда путем преобразований h можно выразить как

$$h = 12,5 \frac{v_{\text{max}}^2}{3,6R} - \frac{g}{S} h, \quad (2)$$

В качестве опытного участка рассматривается один из перегонов Белорусской железной дороги длиной около 10 км, на котором имеется несколько кривых малого и среднего радиусов ($R_1=580 \text{ м}$; $R_2=620 \text{ м}$; $R_3=700 \text{ м}$; $R_4=720 \text{ м}$). Формула $v=4,6 \sqrt{R}$ показывает, какую максимальную скорость теоретически может пропустить данный криволинейный участок пути. В практике, обычно, все скорости по кривым ограничиваются приказом начальника дороги и зависят от многих других факторов (наличия населенного пункта, состояния верхнего строения пути и т. д.). Реконструкция плана линии заключается в увеличении радиусов кривых и их переустройстве. Данное мероприятие длительное и дорогостоящее.

С целью увеличения скоростей на существующих железнодорожных линиях (без изменения геометрии плана) на первом этапе рассчитывается возвышение наружного рельса, исходя из заданных радиусов и скоростей движения поездов по приказу начальника дороги (табл. 1).

Таблица 1

Зависимость $h = f(R)$ при $a_{\text{нп}}=0,7 \text{ м/с}^2$

Радиус R , м	580	620	700	720
Максимальная скорость движения v_{max} , км/ч	75	80	90	95
Возвышение наружного рельса h , мм	7	15	31	43

По полученным значениям строится график зависимости $h = f(R)$ при $a_{\text{нп}}=0,7 \text{ м/с}^2$ (рис. 3).

Из формулы (2) вычисляется значение скорости

$$v_{\text{max}} = \sqrt{\frac{(h + 163a_{\text{нп}})R}{12,5}}. \quad (3)$$

Увеличив в формуле (3) величину непогашенного ускорения с $0,7 \text{ м/с}^2$ до $a_{\text{нп}}=0,8 \div 0,9 \text{ м/с}^2$ на втором этапе, можно получить новые значения скоростей (табл. 2, 3).

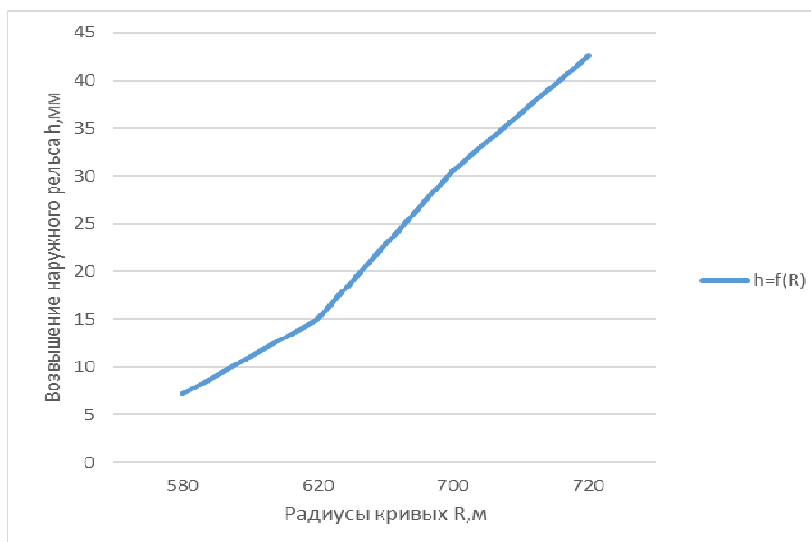


Рис. 3. Графік залежності підвищення зовнішнього рейса від радіуса кривої

Таблиця 2

Залежність $V_{\max} = f(a_{\text{нп}})$ при $a_{\text{нп}}=0,8 \text{ м/с}^2$

Радіус R , м	580	620	700	720
Підвищення зовнішнього рейса h , мм	7	15	31	43
Максимальна швидкість руху v_{\max} , км/ч	80	85	95	100

Таблиця 3

Залежність $v_{\max} = f(a_{\text{нп}})$ при $a_{\text{нп}}=0,9 \text{ м/с}^2$

Радіус R , м	580	620	700	720
Підвищення зовнішнього рейса h , мм	7	15	31	43
Максимальна швидкість руху v_{\max} , км/ч	84	90	100	104

Отримані значення швидкостей при постійному радіусі, підвищенні зовнішнього рейса і різному непогашеному

ускоренні сведені в табл. 4, по результатам которой построен график зависимости $v_{\max} = f(a_{\text{нп}})$ (рис. 4).

Таблиця 4

Швидкість проходження кривих при різному непогашеному ускоренні

Радіус, м	580	620	700	720
Непогашене ускорення, м/с^2				
0,7	75	80	90	95
0,8	80	85	95	100
0,9	84	90	100	104

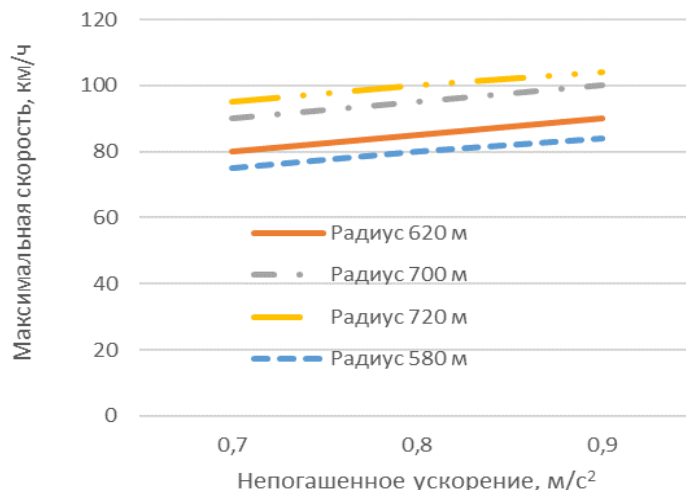


Рис. 4. График зависимости максимальной скорости движения от величины непогашенного ускорения

Из графика видно, что увеличение непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$ ведет к повышению скорости прохождения криволинейных участков пути в среднем на 15 %, что позволит существенно сэкономить финансы без переустройства плана линии. При этом, увеличивая значение

непогашенного ускорения до $0,9 \text{ м/с}^2$, можно уменьшить высоту возвышения наружного рельса в кривой, без изменения скорости прохождения пассажирским поездом криволинейного участка пути (при условии $h > 0$) (табл. 5).

Таблица 5

Изменение величины возвышения наружного рельса при различном непогашенном ускорении

Радиус, м \ Непогашенное ускорение, м/с²	580	620	700	720
	Скорость движения, разрешенная по приказу, v_{max} , км/ч (исходя из $a_{\text{нп}} = 0,7 \text{ м/с}^2$)			
	75	80	90	95
	Расчетные значения возвышения наружного рельса h , мм			
0,7	7	15	31	43
0,8	-9*	-1*	14	26
0,9	-25*	-17*	-2*	10

Примечание. *Имеется резерв повышения скорости движения пассажирских поездов за счет увеличения значения допускаемого непогашенного ускорения $a_{\text{нп}}$.

Например, при установленных значениях $h = 7 \text{ мм}$, $R = 580 \text{ м}$ и $a_{\text{нп}} = 0,9 \text{ м/с}^2$ можно реализовать скорость $v'_{\text{max}} = 84 \text{ км/ч}$ против $v_{\text{max}} = 75 \text{ км/ч}$ (при $a_{\text{нп}} = 0,7 \text{ м/с}^2$),

что подтверждает вывод об увеличении скоростей в среднем на 15 %.

В случае реконструкции железнодорожной линии с учетом возможного

изменения геометрии плана значение радиуса определяется из формулы

$$R = \frac{12,5v_{\max}^2}{h + 163[a_{\text{нп}}]} \quad (4)$$

По формуле (4) рассчитываются значения радиусов при постоянных показателях скорости, возвышения и разном непогашенном ускорении. Полученные данные сводятся в табл. 6 и строится график $R = f(a_{\text{нп}})$ (рис. 5).

Таблица 6

Зависимость величины радиуса кривой от значения непогашенного ускорения

Скорость движения v , км/ч	Возвышение наружного рельса h , мм	Непогашенное ускорение $[a_{\text{нп}}]$, м/с ²		
		0,7	0,8	0,9
84	7	735	649	580
91	15	777	690	620
100	31	858	771	700
104	43	870	788	720

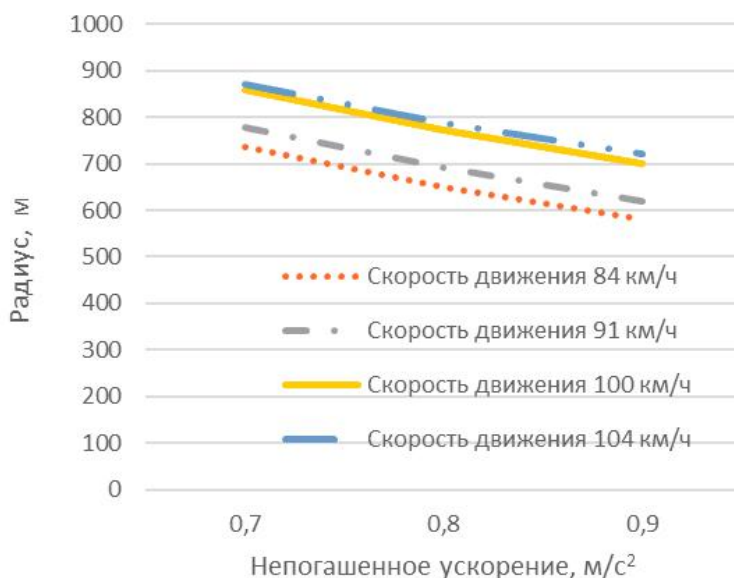


Рис. 5. График зависимости радиуса кривой от величины непогашенного ускорения

Из табл. 6 и рис. 5 видно, что при увеличении границы допускаемого значения непогашенного ускорения реализовать максимальную скорость движения пассажирских поездов при существующем возвышении наружного рельса можно на кривых и меньшего радиуса.

В настоящее время в связи с тем, что на участке Красное-Минск-Брест Белорусской железной дороги транзитом

проходят поезда российского формирования «Стриж», состоящие из вагонов типа Talgo с наклоном кузова, кафедрой «ПСиЭТО» БелГУТа проводятся исследования по определению влияния увеличенного допускаемого значения непогашенного ускорения $[a_{\text{нп}}]$ до 1,1 м/с².

Выводы. Проведенные расчеты подтверждают, что за счет увеличения дополнительного непогашенного ускорения

с 0,7 до 0,9 м/с² можно в зависимости от радиуса криволинейного участка повысить скорости в кривых участках пути на 10–20 км/ч. Таким образом, скорости движения пассажирских поездов при прохождении существующих кривых, без изменения возвышения наружного рельса при минимальных капиталовложениях можно изменять только за счёт увеличения допускаемого значения непогашенного

ускорения. При этом, безусловно, должны соблюдаться требования по технике безопасности и комфортабельность езды пассажиров. Следовательно, существующая на Белорусской железной дороге научно-техническая документация нуждается в корректировке в соответствии с общепринятым значением непогашенного ускорения $a_{нп}$.

Список использованных источников

1. Шахунянц, Г. М. Железнодорожный путь [Текст]: учебник для вузов железнодорожного транспорта / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1969. – 536 с.
2. Карпущенко, Н. И. Возвышение наружного рельса и допускаемые скорости движения поездов в кривых [Текст] / Н. И. Карпущенко // Проблемы повышения скоростей движения поездов на Транссибирской магистрали: сб. науч. тр. – Новосибирск, 1999. – С. 7-15.
3. Курган, Н. Б. Определение объемов работ для снятия ограничений скорости, связанных с планом линии [Текст] / Н. Б. Курган, Н. П. Хмелевская, С. Ю. Байдак // Сб. науч. трудов Дальневосточного гос. ун-та путей сообщения / под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : Из-во ДВГУПС, 2014. – Вып. 2. – С. 52-62.
4. Курган, Д. Н. Методология расчетов железнодорожной колеи при взаимодействии со скоростным подвижным составом [Текст]: автореф. дисс... д-ра техн. наук : 05.22.06 / Д. Н. Курган. – Днепропетровск, 2017. – 35 с.
5. Смелянский, И. В. Совершенствование нормативов непогашенного ускорения и его приращения для современного подвижного состава при скоростном движении [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскания и проектирование железных дорог / И. В. Смелянский. – М. : МИИТ, 2008. – 208 с.
6. Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії [Текст]: ЦП-0236. – Затв. наказом Укрзалізниці від 14.12.2010 №778-Ц. – К., 2010. – 52 с.
7. Эффект ускорения [Электронный ресурс] // газета «Гудок»; АО «Издательский дом «Гудок». – 2012. – Режим доступа : <http://www.gudok.ru/newspaper/?archive=2012.05.15>.
8. Текущее содержание железнодорожного пути. Технические требования и организация работ. Стандарт организации [Текст]: СТП 09150.56.010-2005. – Введ. 01.07.2006. – Минск, 2006. – 284 с.
9. Leaflet 513. Guidelines for evaluating passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles. Traction and Rilling Stock Committee. Paris. 1994.
10. Sirong, Yi. Dynamic Analysis of High-Speed Railway Alignment : Theory and Practice [Text] / Yi Sirong // Technology & Engineering. – Elsevier Science, 2017. – 324 p.

Ковтун Павел Владимирович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.
Тел.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.
Дубровская Татьяна Алексеевна, старший преподаватель кафедры проектирования, строительства и эксплуатации транспортных объектов Белорусского государственного университета транспорта.
Тел.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Ковтун Павло Володимирович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри проектування, будівництва та експлуатації транспортних об'єктів Білоруського державного університету транспорту. Тел.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.

Дубровська Тетяна Олексіївна, старший викладач кафедри проектування, будівництва та експлуатації транспортних об'єктів Білоруського державного університету транспорту. Тел.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Kovtun Pavel Vladimirovich, PhD (Tech.), associate professor, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State University of Transport. Tel.: +375291887701. E-mail: sed@bsut.by.

Dubrovskaya Tatyana Alekseevna, senior lecturer, Department of Design, Construction and Operation of Transport Facilities, Belarusian State Transport University. Tel.: +375445545253. E-mail: rt-555@yandex.ru.

Статтю прийнято 25.10.2018 р.

УДК 629.4.083

ОБҐРУНТУВАННЯ МАНЕВРНОСТІ РЕМОНТНОГО ГОСПОДАРСТВА ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

**Д-р техн. наук О. С. Крашенінін, асистенти О. В. Клименко, О. О. Шапатіна,
асп. С. С. Яковлев**

ОБОСНОВАНИЕ МАНЕВРНОСТИ РЕМОНТНОГО ХОЗЯЙСТВА ЛОКОМОТИВНОГО ДЕПО

**Д-р техн. наук А. С. Крашенинин, ассистенты А. В. Клименко, О.А. Шапатина,
асп. С. С. Яковлев**

JUSTIFICATION OF THE MAINTENANCE SERVICE MANEUVERABILITY OF THE LOCOMOTIVE DEPOT

**D. Sc. (Tech.) O. Krashenin, assistant professor O. Klymenko, O. Shapatina,
postgraduate student S. Yakovlev**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156310>

За кордоном провідні фірми з виробництва рухомого складу вважають доцільним приділяти велику увагу сектору із забезпечення експлуатаційного рухомого складу комплектуючими вузлами й агрегатами і навіть виконання функцій з їхнього ремонту на власному виробництві. Також у деяких країнах, де використовується швидкісний рухомий склад, локомотивні депо забезпечують організацію ремонту не тільки для приписного парку локомотивів, а й за потреби для локомотивів з інших депо. Тому з'являється завдання забезпечення маневрності виробництва, коли підприємство ціною додаткових витрат здійснює заходи, які дозволяють адаптуватися до найрізноманітніших обставин експлуатації тягового рухомого складу (ТРС). За таких умов функція витрат може зростати, але можна очікувати на її зменшення у певних ситуаціях, що можуть виникнути в майбутньому.

Ключові слова: локомотив, ремонтне обладнання, ремонт, ремонтне господарство, стратегія обслуговування.

За рубежом ведущие фирмы по производству подвижного состава считают целесообразным уделять все больше внимания сектору по обеспечению эксплуатационного подвижного состава комплектующими узлами и агрегатами, а также выполнению функций по их ремонту на собственном производстве. Кроме того, в некоторых странах, особенно там, где используется скоростной подвижной состав, локомотивные депо обеспечивают организацию ремонта не только для приписного парка локомотивов, а и при необходимости для локомотивов из других депо. Отсюда возникает задача обеспечения маневренности производства, когда предприятие ценой дополнительных затрат осуществляет мероприятия, которые позволяют адаптироваться к различным обстоятельствам эксплуатации тягового подвижного состава (ТПС). В таких условиях функция издержек может расти, но можно ожидать ее уменьшения в некоторых ситуациях, которые могут возникнуть в будущем.

Ключевые слова: локомотив, ремонтное оборудование, ремонт, ремонтное хозяйство, стратегия обслуживания.

Abroad, leading companies in the production of rolling stock consider it expedient to pay more and more attention to the sector on providing operational rolling stock with components and assemblies, as well as to perform the functions of repairing them in-house. In addition, in some countries, especially where high-speed rolling stock is used, locomotive depots provide repair services not only for the assigned locomotive fleet, but also, if necessary, for locomotives from other depots. This raises the problem of ensuring the maneuverability of production, when the company, at the cost of additional expenses, carries out measures that allow it to adapt to various circumstances of the operation of the TRS. In such circumstances, the cost function may increase, but it can be expected to decrease in some situations that may arise in the future. A common and simple mean of maneuverability for any production is the presence of a number of reserves, allowing to adapt to such situations of a random nature, such as an unexpected increase in demand, temporary supply disturbances, short-term difficulties in acquiring stocks. Another form of ensuring the maneuverability of an enterprise is associated with the creation of unspecialized multipurpose equipment adapted to maintain various types and volumes of work, depending on the possibilities of delivery or the existing market prices. The maneuverability of production is also achieved as a result of the creation of universal equipment that allows readjustment. In other cases, the adjustment may involve the possibility, for example, to carry out on-site internal reconstruction of any production unit when the structure of the enterprise has changed. Modern maintenance facilities for repairing locomotives in Ukraine have been planning their work for many years, focusing on stable operating and management conditions without significant technological and infrastructural changes. Changes that accompany the current state of the repair infrastructure require the determination of new approaches in organizing the work of all parts of this component of locomotive maintenance. Based on this, the task has a significant practical value, scientific value and relevance.

Keywords: locomotive, repair equipment, repair, maintenance servise, service strategy.

Вступ. Зважаючи на загальну стагнацію галузі, поки не вдається досягти суттєвих змін у поліпшенні ефективності роботи локомотиворемонтних підприємств [1].

Заплановані кроки з реструктуризації підприємств і господарств локомотиворе-

монтних заводів і депо, що зосереджені саме на впорядкуванні й реформуванні підприємств ПАТ «Укрзалізниця», поки не набули потрібного поступу.

За цих умов потрібна реалізація обґрунтованих дій, що дозволять перейти на нову систему підтримки й відновлення

діючого тягового рухомого складу і підготовки до експлуатації нового ТРС.

Загальним і простим засобом упровадження маневреності в будь-яке виробництво є створення низки запасів, що дозволяє пристосуватися до таких ситуацій випадкового характеру, як непередбачене підвищення попиту, тимчасові хиби в постачанні, нетривалі труднощі протягом придбання запасів.

Інша форма забезпечення маневреності підприємства пов'язана зі створенням неспеціалізованого багатоцільового обладнання, пристосованого для обслуговування різних видів і обсягів роботи залежно від можливостей постачання або наявних ринкових цін.

Маневреність виробництва досягається також і в результаті створення універсального обладнання, що допускає переналагодження. В інших випадках пристосування може полягати в можливості реалізації на місці внутрішньої перебудови будь-якого виробничого підрозділу, коли структура підприємства змінилася.

Сучасні ремонтні господарства з ремонту локомотивів в Україні багато років планували свою роботу, орієнтуючись на стабільні умови експлуатації і господарювання, без суттєвих технологічних та інфраструктурних змін. Зміни, що супроводжують нинішній стан ремонтної інфраструктури, потребують визначення нових підходів із організації роботи всіх ланок цієї складової утримання локомотивів. Зважаючи на згадане, порушене завдання має високу наукову й практичну цінність і актуальність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам ефективного використання виробничих потужностей підприємств приділяється багато уваги як за кордоном, так і в нашій країні.

Особливого значення ці проблеми набули в умовах зародження ринкових відносин на тлі стагнації галузі. Велику кількість вітчизняних досліджень присвячено розробленню методології

визначення життєвого циклу з метою оптимізації окремих його складових [12, 13]. У роботах [14, 15, 16] порушуються питання ефективного використання локомотивів у понаднормативний період за умови коригування технологічного забезпечення і міжремонтних пробігів.

Зважаючи на надзвичайну важливість завдань ефективного використання виробничих потужностей у сучасних умовах, набули розвитку й реалізовані як логістичні, так і економічні методи оптимізації роботи підрозділів промислових підприємств [2, 3, 17, 18].

З математичних методів, що органічно описують роботу елементів виробництва, заслуговують уваги методи теорії дослідження операцій, методи динамічного й нечіткого програмування тощо [6, 8, 6, 10].

У роботах [4, 5, 9] вивчено питання оптимізації управління підприємством із використанням цих методів.

У фахових вітчизняних виданнях приведено результативні дослідження з оптимізації систем утримання рухомого складу [7, 8].

Широкий спектр досліджень вивчає сучасні завдання, які, на жаль, не повною мірою враховують сучасні реалії. Зокрема це стосується необхідності створення умов конкурентоспроможності галузі, особливо відносно авіаційних та автомобільних перевезень. Зараз перед галуззю поставлені завдання освоєння швидкісного руху, використання якого орієнтується на ефективну систему його утримання і спроможність надавати ремонтні послуги як приписному парку локомотивного депо, так і послуги з обслуговування та ремонту локомотивів, що приписані до інших депо. Це актуалізує завдання обґрунтування маневреності ремонтного господарства.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є визначення чинників, що впливають на забезпечення маневреності потужностей ремонтного господарства локомотивних депо для

створення можливості проведення ремонтних заходів для локомотивів не тільки приписного парку депо, а й локомотивів з інших депо.

Завданнями дослідження є:

— розроблення моделі вибору обладнання, яке застосовується для ремонту локомотивів, для забезпечення маневреності ремонтного господарства;

— визначення зони ефективності маневреності обладнання для ремонту локомотивів;

— узагальнення моделі для можливості вибору маневреного обладнання при переході до сервісного обслуговування локомотивів.

Основна частина дослідження.

Розглянемо модель, в якій припустимо, що вибір обладнання для ремонту здійснюється виключно між маневреними 1 та неманевреними 2 видами обладнання, що забезпечує виконання однакових функцій і вартість якого відповідно дорівнює c_1 та c_2 ($c_1 > c_2$).

У завданнях, що виникають при роботі підприємства в умовах невизначеності ситуації з організацією роботи підрозділів, зустрічаємося зі «станами середовища» (оснащення підприємства) і з «рішеннями підприємства». У початковий момент існує певний стан середовища, який диктує напрямок капіталовкладень, що здійснюються підприємством. Передбачається, що таке рішення приймається попередньо, до постановки завдання. Рішення, яке є предметом дослідження, полягає у виборі технічних характеристик об'єкта, у який робиться капіталовкладення. Крім того, у цій моделі припускається, що вибір полягає у простій альтернативі між неманевреною технікою і технікою маневреною. Маючи одну й ту ж форму і однакове місце розташування, обидва види обладнання 1 і 2 виконують одні й ті ж функції з урахуванням стану середовища (ремонтної бази і стану локомотива) в початковий момент ремонту.

І навпаки, витрати на капіталовкладення, експлуатацію, ремонт і оновлення обладнання відрізняються: дисконтовані до початкового моменту, вони дорівнюють c_1 для рішення 1 та c_2 – для рішення 2.

Стан ремонтної бази між початковим моментом ремонту і моментом його закінчення передбачається незмінним. У момент закінчення виникають нові умови організації ремонту, які передбачаються визначеними і породжують відому непристосованість x зовнішніх характеристик (вид обладнання, його стан, розташування тощо) початкового капіталовкладення. Перед підприємством постає необхідність зробити вибір, який зводиться до альтернативи: пристосовуватися або не пристосовуватися (виконувати чи не виконувати ремонт). Цей вибір диктується зіставленням витрат при вимозі (не виконувати ремонт) та витрат при реадaptaції (організації ремонту). Причому як ті, так і інші витрати дисконтуються до одного й того ж моменту, який є початковим моментом, що забезпечує порівнянність витрат з початковим вкладенням.

Витрати, пов'язані з відмовою від реорганізації ремонту, практично залежать тільки від стану ремонтної бази і стану локомотива x , але не від початкового рішення, оскільки у варіантах 1 і 2 зовнішні характеристики обладнання є однаковими. Тому можна привести у відповідності зі станом середовища витрати, які дисконтуються $p(x)$, що є різницею між експлуатаційними витратами при рішенні, заснованому на відмові від пристосування до організації ремонту, і витратами при рішенні про пристосування до організації ремонту. За допомогою вибору змінної x , яка відображує стан середовища, завжди можна замінити $p(x)$ на x . Витрати, що дисконтуються, пов'язані з реадaptaцією, дорівнюють $g_1(x)$ для рішення 1 і $g_2(x)$ для рішення 2, причому g_1 і g_2 являють собою зростаючі функції від x . У

загальному випадку це повільно зростаючі функції, бо основні витрати визначаються фактом переробки обладнання, аніж значимістю внесених змін.

Відкладемо значення x по осі абсцис і значення витрат, що дисконтуються $P(x)$, по осі ординат. Стратегія ремонтного господарства депо визначається із зображеного на рис. 1 графіка.

Як видно з наведеного графіка, для ремонтного господарства доцільніше взяти на себе витрати, пов'язані з відмовою від пристосування до x , ніж витрати, пов'язані з реадптацією: $g_1(x)$ – для капіталовкладення 1, $g_2(x)$ – для капіталовкладення 2 при

$$0 < x < a. \quad (1)$$

Для ремонтного господарства вигідніше пристосуватися до нових обставин, ніж нести витрати, пов'язані з відмовою від пристосування, якщо витрати на удосконалення обладнання становлять $g_1(x)$, тобто якщо воно з самого початку обрало маневрене обладнання за умови

$$a_1 < x < a_2. \quad (2)$$

Для ремонтного господарства вигідніше зазнавати витрат, пов'язаних із відмовою від пристосування до x , ніж витримувати витрати, пов'язані з пристосуванням до нових обставин, якщо ці останні дорівнюють $g_2(x)$, тобто якщо підприємство в початковий момент вибрало неманеврене обладнання $a_2 < x$.

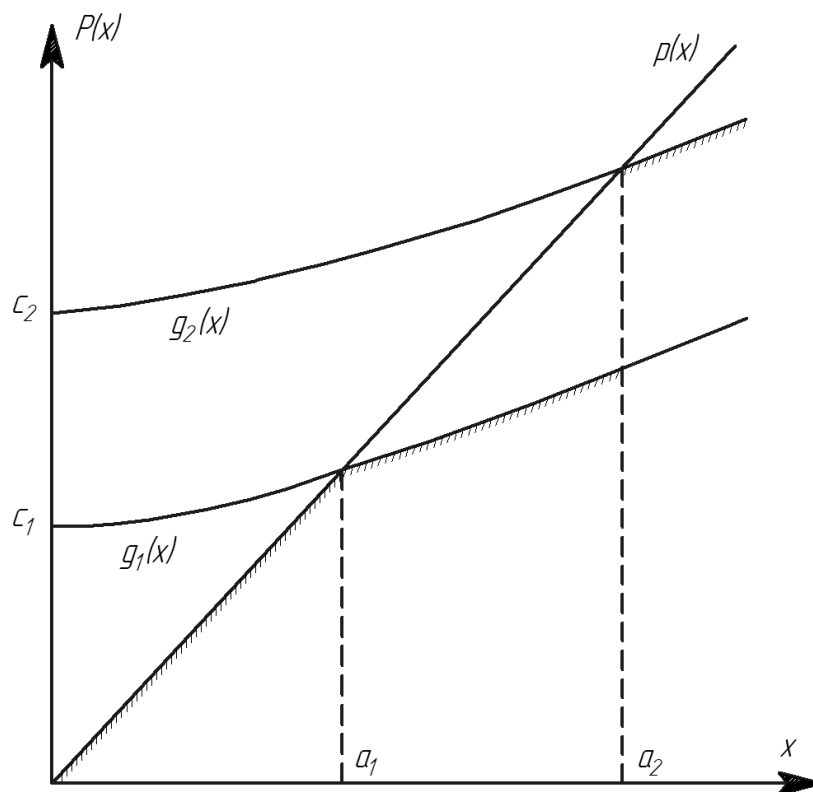


Рис. 1. Вибір стратегії маневреності ремонтного господарства:
 $P(x)$ – витрати, що дисконтуються; x – характеристика стану середовища;
 $p(x)$ – функція дисконтованих витрат при відмові від маневреності

Для ремонтного господарства в усіх випадках вигідно пристосуватися до нового становища, тобто до маневреності ремонтного обладнання.

Маневреність обладнання має дві переваги з точки зору початкових витрат. Вона зменшує витрати, пов'язані з пристосуванням до нових обставин у всьому діапазоні, де в будь-якій формі відбувається це пристосування, і розширює діапазон, у якому має сенс пристосуватися заново.

У початковий момент ступінь нездатності (відмови) до пристосування обладнання являє собою випадкову змінну x , щодо якої припускаємо, що їй можна приписати деяку функцію розподілу $F(x)$.

У разі варіанта 1 сумарні витрати, що дисконтуються, складуть

$$D_1 = c_1 + \int_0^{+\infty} \min[x, g_1(x)]dF(x), \quad (3)$$

де $[x, g_1(x)]$ є найменшим з двох значень x і $g_1(x)$. Попередній вираз можна записати в явному вигляді:

$$D_1 = c_1 + \int_0^{a_1} xdF(x) + \int_{a_1}^{+\infty} g_1(x)dF(x). \quad (4)$$

Відповідно вираз для варіанта 2 має такий вигляд:

$$D_2 = c_2 + \int_0^{a_2} xdF(x) + \int_{a_2}^{+\infty} g_2(x)dF(x). \quad (5)$$

Оптимальне рішення відповідає найменшому з двох значень D_1 і D_2 .

Якщо, наприклад, $g_1(x) = a_1$, $g_2(x) = a_2$ і закон розподілу ймовірностей X є рівномірним в інтервалі від 0 до b , то краще обрати маневрене обладнання, але при тому і тільки за тієї умови, що

$$D_1 < D_2, \quad (6)$$

де

$$\begin{aligned} D_1 &= c_1 + \int_0^{a_1} xdF(x) + \int_{a_1}^{+\infty} a_1 dF(x) = c_1 + \frac{x^2}{2} \Big|_0^{a_1} + a_1 \cdot x \Big|_{a_1}^b = \\ &= c_1 + \frac{a_1^2}{2} + a_1 b - a_1^2 = c_1 + a_1 b - \frac{a_1^2}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$D_2 = c_2 + a_2 - \frac{a_2^2}{2}. \quad (8)$$

тоді

$$\begin{aligned} D_1 - D_2 &= c_1 + a_1 b - \frac{a_1^2}{2} - c_2 - a_2 b + \frac{a_2^2}{2} = (c_1 - c_2) + b(a_1 - a_2) + \frac{a_2^2 - a_1^2}{2} = \\ &= (c_1 - c_2) + \left[b(a_1 - a_2) - (a_1 - a_2) \frac{a_1 + a_2}{2} \right] = (c_1 - c_2) + (a_1 - a_2) \left(b - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) = \\ &= (c_1 - c_2) + b(a_1 - a_2) \left(1 - \frac{a_1 + a_2}{2b} \right) = (a_1 - a_2) \left(b - \frac{a_1 + a_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Й остаточно повинна виконуватись умова

$$c_1 - c_2 < b(a_1 - a_2) \cdot \left(1 - \frac{a_1 + a_2}{2b}\right). \quad (10)$$

Для наочності подамо виконання цієї умови у графічному вигляді на рис. 2.

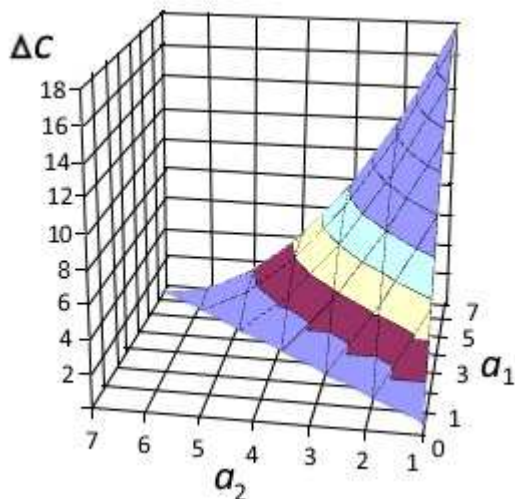


Рис. 2. Графік залежності $\Delta C = f(a_1, a_2)$ для рівномірного розподілу ступеня відмови від пристосування обладнання до зовнішнього середовища

З цієї залежності можна попередньо оцінювати приведені витрати на маневрене ремонтне обладнання для контролю, діагностування і ремонту систем та агрегатів локомотивів.

Можна спробувати узагальнити попередній аналіз у різних напрямках. Найбільш просте узагальнення полягає у припущенні, що в початковий момент ремонтне господарство має можливість вибору більш-менш маневреного обладнання. Охарактеризуємо ступінь неманевреності безперервної змінної y , якій відповідають витрати, що дисконтуються $c(y)$.

Якщо й далі позначати через x дисконтвані витрати, пов'язані з відмовою від пристосування ремонтної бази, то дисконтвані витрати, пов'язані з пристосуванням до нових обставин, будуть виражатися через $g(x, y)$, а вираз $x = g(x, y)$ буде еквівалентний виразу $x = a(y)$. Пристосування до нових обставин здійснюється у той момент і тільки у тому випадку, коли $x > a(y)$ (при умові, що g являє собою повільно зростаючу функцію x). Сумарні витрати, що дисконтуються, складатимуть

$$D(y) = c(y) + \int_0^{+\infty} \min[x, a(y)] dF(x) c(y) + \int_0^{a(y)} x dF(x) + \int_{a(y)}^{+\infty} g(x, y) dF(x). \quad (11)$$

Оптимальна стратегія визначається умовою $\min_y D(y)$.

У розглянутій моделі пристосування до нових обставин потенційно міститься в обраній стратегії. Тобто ремонтне господарство вже більше не має альтернативи пристосовувати або не пристосовувати своє обладнання. Вибір диктується з огляду на той стан середовища, який наявний у цей момент.

Висновки. Наведена модель потребує швидкої реакції на зовнішні впливи й не може бути узагальнена на область відкладення вибору. Одночасно оперативна

дія наведеної методики передбачає, що наступні стани середовища можуть бути перераховані, визначені на основі наявної інформації з урахуванням можливих ситуацій.

Зони ефективності й абсолютні значення величини ΔC виглядають, як на рис. 2, і демонструють, що зі зростанням експлуатаційних витрат виникає потреба у вищих капітальних вкладах у забезпечення маневреності ремонтного фонду локомотивного депо.

Узагальнена модель дозволяє при обраній стратегії урахувати зміну зовнішніх впливів.

Список використаних джерел

1. Про затвердження Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро та дизель-поїздів) [Текст] : наказ Укрзалізниці № 093-ЦЗ від 30.06.2010 р. – К. : Укрзалізниця, 2010. – 14 с.
2. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки [Текст]. – К. : Укрзалізниця, 2008. – 182 с.
3. Пустовой, В. Н. Перспективы оптимизации системы ремонта локомотивов [Текст] / В. Н. Пустовой // Перспективы развития сервисного обслуживания локомотивов: материалы Междунар. практ. конф. 14 октября 2015 г. – М. : ВНИИЖТ, 2015. – 15 с.
4. Экономика железнодорожного транспорта [Текст] : учебник для вузов ж.-д. трансп. / Н. П. Терёшина, В. Г. Галабурда, М. Ф. Трихунков и др.; под ред. Н. П. Терёшиной, Б. М. Лапидуса, М. Ф. Трихункова. – М. : УМЦ ЖДТ, 2006. – 801 с.
5. Беллман, Р. Э. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус; пер. с англ. Н. М. Митрофановой, А. А. Первозванского, А. П. Хусу, О. В. Шалаевского; под ред. А. А. Первозванского. – М. : Наука, 1965. – 460 с.
6. Беллман, Р. Э. Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман; пер. с англ. И. М. Андреевой, А. А. Корбута, И. В. Романовского, И. Н. Соколовой; под ред. Н. Н. Воробьева. – М. : Издательство иностранной литературы. 1960. – 420 с.
7. Justification of Statutory Service Life Extension of Locomotives on the Basis of Theory of Aging [Text] / O. S. Krashenin, O. V. Klymenko, O. V. Ponomarenko, S. S. Yakovlev // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 4.3. – P. 174-178.
8. Крашенінін, О. С. Вибір та оцінка параметрів системи утримання локомотивів [Текст] / О. С. Крашенінін // Зб. наук. праць Української держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 150. – С. 121-124.
9. Лебедев, Ю. А. Сетевые модели при ремонте локомотивов [Текст] / Ю. А. Лебедев, Ф. Е. Овчинников. – М. : Транспорт, 1981. – 254 с.
10. Bellman, R. On a Routing Problem [Text] / R. Bellman // Quarterly of Applied Mathematics. – 1958. – Vol. 16, No. 1. – P. 87-90.
11. Вентцель, Е. С. Исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио», 1972. – 552 с.

12. Методы оценки жизненного цикла тягового подвижного состава железных дорог [Текст] : монография / Э. Д. Тартаковский, С. Г. Грищенко, Ю. Е. Калабухин [и др.]. – Луганск : Изд-во «Ноулидж», 2011. – 174 с.

13. Оцінка показників ТО при подовженні терміну експлуатації ТРС по наробці [Текст] / Е. Д. Тартаковський, О. В. Устенко, О. С. Крашенінін [та ін.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків : УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 132. – С. 5-11.

14. Галкин, В. Г. Надежность тягового подвижного состава [Текст] : учеб. пособие для вузов ж.-д. трансп. / В. Г. Галкин, В. П. Парамзин, В. А. Четверов. – М. : Транспорт, 1981. – 184 с.

15. Крашенінін, О. С. Покращення організації технічного обслуговування та поточного ремонту тягового рухомого складу в післянормативний термін його використання [Текст] / О. С. Крашенінін, О. О. Шапатіна, Ю. В. Черняк // Транспортні інновації. – К., 2011. – № 9. – С. 26-28.

16. Крашенінін, О. С. Оцінка ефективності системи подовження терміну служби ТРС більш нормативного і оновлення експлуатаційного парку [Текст] / О. С. Крашенінін, П. О. Харламов // Вісник Східноукраїнського університету ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2012. – № 3(174). – С. 109-113.

17. Li, Changle. An incentive-based optimizing strategy of service frequency for an urban rail transit system [Text] / Changle Li, Jiao Ma, Tom H. Luan, Xun Zhou, Lei Xiong // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2018. – Vol. 118. – P. 106-122.

18. Nourbakhsh, S. Optimal fueling strategies for locomotive fleets in railroad networks [Text] / S. Nourbakhsh, Y. Ouyang // Transportation Research Part B: Methodological. – 2010. – Vol. 44, Issues 9. – P. 1104-1114.

Крашенінін Олександр Семенович, д-р техн. наук, професор кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (097) 991-70-99. E-mail: alsem1512@gmail.com.

Клименко Олександр Вікторович, асистент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095) 697-08-55. E-mail: kaverrs@gmail.com.

Яковлев Сергій Сергійович, аспірант кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (095) 723-09-20. E-mail: pomndu@ukr.net.

Шапатіна Ольга Олександрівна, асистент кафедри управління вантажною і комерційною роботою Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (097) 461-06-00. E-mail: shapatina@ukr.net.

Крашенинин Александр Семенович, д-р техн. наук, профессор кафедры эксплуатации и ремонта подвижного состава Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (097) 991-70-99. E-mail: alsem1512@gmail.com.

Клименко Александр Викторович, ассистент кафедры эксплуатации и ремонта подвижного состава Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (095) 697-08-55. E-mail: kaverrs@gmail.com.

Яковлев Сергей Сергеевич, аспирант кафедры эксплуатации и ремонта подвижного состава Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (095) 723-09-20. E-mail: pomndu@ukr.net.

Шапатина Ольга Александровна, ассистент кафедры управления грузовой и коммерческой работой Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (097) 461-06-00. E-mail: shapatina@ukr.net.

Krasheninina Oleksandr Semenovich, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (097) 991-70-99. E-mail: alsem1512@gmail.com.

Klymenko Oleksandr Viktorovich, assistant professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (095) 697-08-55. E-mail: kaverrs@gmail.com.

Yakovlyev Serhiy Serheevich, postgraduate student, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (095) 723-09-20. E-mail: pomndu@ukr.net.

Shapatina Olha Oleksandrivna, assistant professor, Department of Maintenance and Repair of Rolling Stock, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (097) 461-06-00. E-mail: shapatina@ukr.net.

Статтю прийнято 30.10.2018 р.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 621.313.322

ШЛЯХИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ

Кандидати техн. наук О. Д. Супрун, О. І. Семененко, Ю. О. Семененко,
магістранти С. С. Кузьмін, В. Р. Домарацький

ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРИОДИЧНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ

Кандидаты техн. наук А. Д. Супрун, А. И. Семененко, Ю. А. Семененко,
магистранты С. С. Кузьмин, В. Р. Домарацкий

WAYS OF OPTIMIZING THE PERIODICITY OF TECHNICAL SERVICE OF EQUIPMENT OF ELECTRIC DRIVE SYSTEMS

PhD (Tech.) O. Suprun, PhD (Tech.) O. Semenenko, PhD (Tech.) Y. Semenenko,
masters S. S. Kuzmin, V. R. Domaratskyi

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156407>

У статті показано, що оптимальна періодичність проведення технічного обслуговування систем електричної тяги визначається її надійністю (наробітком на відмову T_0), а також середнім часом, що витрачається на виконання одного технічного обслуговування (ТО) $t_{\text{П}}$. Отримано математичні співвідношення для вибору періодичності ТО з умови максимальної імовірності виявлення несправності. Розроблено алгоритм послідовності проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО. Отримано математичний опис оптимального значення періоду між обслуговуваннями з умови мінімального значення коефіцієнта непрацездатного стану. Запропоновано методіку вибору періодичності технічного обслуговування з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання.

Ключові слова: електропостачання, наробіток на відмову, коефіцієнт непрацездатного стану, надійність обладнання.

В статье показано, что оптимальная периодичность проведения технического обслуживания систем электрической тяги определяется ее надежностью (наработкой на отказ T_0), а также средним временем, затрачиваемым на выполнение одного технического обслуживания (ТО) $t_{\text{П}}$. В результате получены математические соотношения для выбора периодичности ТО из условия максимальной вероятности обнаружения неисправности. Разработан алгоритм последовательности расчета оптимальных сроков проведения ТО. Получено математическое описание оптимального значения периода между обслуживаниями из условия минимального значения коэффициента неработоспособного состояния. Предложена методика выбора периодичности технического обслуживания из условия минимального коэффициента неработоспособного состояния оборудования.

Ключевые слова: электроснабжение, наработка на отказ, коэффициент неработоспособного состояния, надежность оборудования.

In the article it is shown that the optimal frequency of maintenance of systems of electric traction is determined by its reliability, as well as the average time spent on the performance of one maintenance (M). More reliable equipment should be serviced less frequently. In addition, the more time is spent on one service, one can deeply control the equipment and prevent more failures, and hence the maintenance period increases. Determination of the frequency of maintenance on the basis of the results of periodic control of the parameters of equipment and its elements allows you to determine the most expedient term of maintenance, as well as the elements used. A feature of standard methods for determining the frequency of maintenance is that they require the availability of certain statistical data on the operation of elements of equipment or equipment in general. This circumstance greatly complicates and increases the error of calculations, which is not unimportant factor in determining the methods of periodicity of maintenance. They also do not allow to judge the feasibility of carrying out maintenance on this particular equipment of electric traction systems. Unlike these methods, determining the frequency of maintenance based on the results of periodic monitoring of equipment parameters and its elements allows you to determine the most appropriate period of maintenance, as well as elements whose preventive replacement is most appropriate. Mathematical relations are obtained for the choice of periodicity of maintenance from the condition of maximum probability of detection of a malfunction. The algorithm of the sequence of the calculation of the optimal terms of the maintenance is developed. The mathematical description of the optimal value of the period between maintenance with the condition of the minimum value of the non-working condition factor is obtained. The method of the choice of periodicity of technical maintenance is offered from the condition of the minimum factor of the non-operating condition of the equipment.

Keywords: power supply, work time for failure, coefficient of inoperative condition, reliability of equipment.

Вступ. Організація технічного обслуговування (ТО), його зміст і методика проведення, вимоги до кількості обслуговуючого персоналу і його кваліфікації багато в чому залежать від якостей, закладених в обладнання при його конструюванні і виробництві [1]. Однак не можна вважати експлуатацію пасивним періодом у питаннях поліпшення якості проведення ТО. Пошук найбільш раціональних методів і способів проведення ТО є дуже важливим завданням. Правильна організація ТО вимагає ретельного вивчення цілого ряду питань [2-4]. До них можна віднести вибір системи технічного обслуговування; визначення параметрів ТО; оптимізацію параметрів ТО за різними критеріями; розроблення критеріїв кількісної оцінки якості ТО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання вибору оптимальної періодичності технічного обслуговування складається у визначенні такого його значення, при якому обраний якісний або кількісний показник набуває екстремального значення. Сутність методів [5, 6] визначення періодичності ТО, заснованих на використанні даних про експлуатаційну надійність обладнання в цілому, полягає у виборі інтервалу часу, протягом якого параметр, що характеризує реальний технічний стан обладнання, досягає граничного значення. Можливе визначення періодичності проведення ТО з умови забезпечення максимальних значень експлуатаційних характеристик [8], тобто вибір такого інтервалу часу, при якому необхідна характеристика в заданих умовах буде максимальною. Особливістю

викладених методів [4, 9] визначення періодичності ТО є те, що вони вимагають наявності визначених статистичних даних про експлуатацію елементів обладнання або обладнання в цілому. Також вони не дозволяють судити про доцільність проведення ТО на даному конкретному устаткуванні систем електричної тяги.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є обґрунтування оптимальної періодичності технічного обслуговування обладнання систем електричної тяги з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання. Завдання дослідження полягають в отриманні математичних співвідношень для вибору періодичності технічного обслуговування з умови максимальної імовірності виявлення несправності, розробленні алгоритму послідовності проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО та методики вибору періодичності технічного обслуговування з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання.

Основна частина дослідження. У наш час найбільшого поширення знайшла змішана система ТО [6-10]. Її застосування доцільне для ТО обладнання, ушкодження і відмови якого обумовлені як процесом зносу, так і процесами старіння. Вибір системи ТО ґрунтується на урахуванні надійності експлуатованого обладнання. Критерієм вибору тієї чи іншої системи ТО може бути співвідношення

$$\varphi = \frac{n_{cp}(T_P)}{n_{cp}(T_{XP})} = \frac{\lambda_P \cdot T_P}{\lambda_{XP} \cdot T_{XP}}, \quad (1)$$

де T_P , T_{XP} – відповідно сумарний час роботи і збереження обладнання;

$n_{cp}(T_P), n_{cp}(T_{XP})$ – середня кількість відмов обладнання при його роботі і збереженні;

λ_P, λ_{XP} – інтенсивності відмов обладнання відповідно під час роботи і при збереженні.

З цього виразу випливає, що, якщо $\varphi = 1$, то в однаковій мірі може бути обрана будь-яка система ТО (календарна чи за наробітком). Однак доцільно скористатися календарною системою як більш зручною для планування ТО. При $\varphi > 1$ вибирають систему за наробітком, при $\varphi < 1$ – календарну систему ТО. Вибір системи ТО ґрунтується на урахуванні надійності експлуатованого обладнання. За основу при обґрунтуванні періодичності ТО можуть бути узяті такі дані: статистичні характеристики комплектуючих елементів обладнання (наприклад, λ – характеристики щільності розподілу параметрів елементів як функції часу чи умов функціонування); характеристики експлуатаційної надійності обладнання в цілому; результати періодичного контролю вихідних параметрів обладнання і параметрів його комплектуючих елементів. За відомими λ – характеристиками елементів – визначається елемент (чи елементи), що має найменшу тривалість ділянки характеристики, на якому $\lambda = \text{const}$. Отриманий інтервал часу t_{\max} являє собою найбільший припустимий час між замінами цього елемента. Оскільки зазначений інтервал для інших елементів обладнання може бути іншим, доцільно періодичність заміन цих елементів визначати з розумним обліком інтервалу t_{\max} , тобто таким чином, щоб одержати рівномірну за часом сітку профілактичних замін елементів. Недоліком цього методу призначення періодичності є те, що він не враховує можливі поступові відмови елементів, що обумовлені порівняно повільними змінами параметрів елементів.

На відміну від зазначених методів, визначення періодичності ТО на підставі результатів періодичного контролю параметрів обладнання і його елементів дозволяє визначити найбільш доцільний

термін проведення ТО, а також елементи, профілактична заміна яких найбільш доцільна.

При визначенні оптимального періоду технічного обслуговування з умови забезпечення максимального рівня безвідмовної роботи СЕП за кількісний критерій оптимальності приймаємо коефіцієнт експлуатаційної готовності

$$K_{EG}(t) = K_{тв} \cdot P(t), \quad (2)$$

де $K_{ТВ} = \frac{t_{\Sigma раб}}{t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma П} + t_{\Sigma В}}$ – коефіцієнт

технічного використання;

$$P(T_P) = \exp\left(-\frac{t_P}{T_{OP\Phi}}\right) \quad - \quad \text{імовірність}$$

безвідмовної роботи апаратури за період обслуговування;

$t_{\Sigma раб}$ – сумарний час, протягом якого апаратура знаходиться в працездатному стані і вільна від технічного обслуговування і поточного ремонту;

$t_{\Sigma П}$ – сумарний час, затрачений на ТО за визначений календарний термін;

$t_{\Sigma В}$ – сумарний час, що затрачено на усунення відмов апаратури за той самий календарний термін;

$t_{\Sigma P}$ – період ТО апаратури.

Сумарний час $t_{\Sigma П}$ визначається як

$$t_{\Sigma П} = t_{П} \cdot m, \quad (3)$$

де t_n – середній час виконання одного ТО (тривалість одного обслуговування);

$$m = \frac{T_{OP\Phi} + t_B}{t_P} \quad - \quad \text{частота обслуговування;}$$

$T_{OP\Phi}$ – наробіток обладнання, що обслуговується, на одну відмову;

t_B – середній час відновлення апаратури.

Сумарний час $t_{\Sigma В}$ визначається співвідношенням

$$t_{\Sigma В} = \sum t_{vi} = n \cdot t_e, \quad (4)$$

де t_{vi} – час усунення i -ї відмови;

n – кількість відмов за календарний термін.

Сумарний час перебування апаратури у працездатному стані $t_{\Sigma P}$ визначається за формулою

$$t_{\Sigma раб} = T_{OP\Phi} \cdot n \quad (5)$$

Підставимо вирази (2) і (3) у формулу (1) і одержимо загальний вираз для коефіцієнта експлуатаційної готовності

$$K_{EG} = \frac{t_{\Sigma раб}}{t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma П} + T_{\Sigma В}} \cdot \exp\left(-\frac{T_P}{T_{OP\Phi}}\right). \quad (6)$$

У цьому виразі коефіцієнт експлуатаційної готовності є складною функцією періоду технічного обслуговування t_P . З одного боку, зі збільшенням t_P зменшується $t_{\Sigma П}$, тобто перший співмножник виразу (5) збільшується, з іншого боку, збільшення t_P неминуче призводить до зменшення ймовірності $P(t_P)$, тобто другий співмножник виразу (5) зменшується.

Існує якесь оптимальне значення t_{Popt} , що відповідає максимальному значенню K_{EGmax} . Графік залежності співмножників виразу (6), а також самого коефіцієнта K_{EG} від величини t_P наведені на рис. 1.

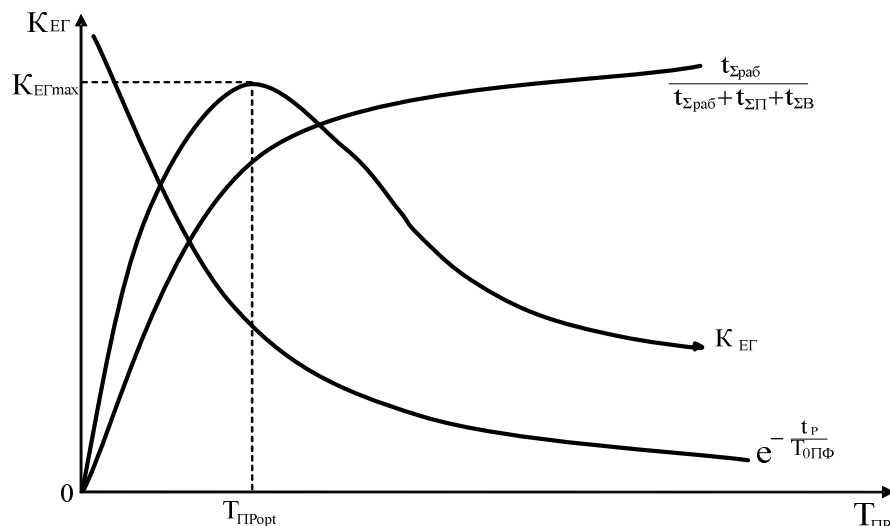


Рис. 1. Графік функції $K_{EG} = f(t_p)$

Знайдемо вираз для оптимального значення періоду проведення технічного обслуговування. Для цього зробимо такі припущення.

1. Система може знаходитися тільки на одному з трьох стані: або в робочому стані, або в стані обслуговування, або в стані відновлення після виникнення відмови, тобто $T_E = t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma П} + t_{\Sigma В}$. З розгляду виключаються просто апарати, не зв'язані з поточним ремонтом і обслуговуванням (збереження, транспортування, доставка ЗП, плановий ремонт і інші простої).

2. Тривалість кожного обслуговування і його продуктивність заздалегідь визначені і від одного обслуговування до іншого не змінюються, тобто $t_{П} = \text{const}$.

3. Будемо вважати, що розгляд ведеться тільки на інтервалі між двома відмовами, тобто $m > n = 1$.

4. Відмовами апаратури контролю будемо нехтувати, а також будемо вважати, що апаратура контролю забезпечує абсолютну вірогідність контролю. Для спрощення поставленого завдання урахування прийнятих допущень і

позначень після підстановки виразів (3), (4), (5) у (6) одержимо:

$$K_{EG} = \frac{1}{1 + am + b} \exp\left(-\frac{1+b}{m}\right), \quad (7)$$

де $a = \frac{t_{П}}{T_{0ПФ}}$ – показник норми обслуговування;

$$b = \frac{t_{В}}{T_{0ПФ}} \text{ – показник норми надійності.}$$

Величина a характеризує частину часу обслуговування, що припадає на одну годину середнього часу безвідмовної роботи. Величина b показує співвідношення середніх величин простою апаратури під відновленням і її безвідмовною роботою.

Для того щоб визначити оптимальне значення періоду технічного обслуговування t_{Popt} , спочатку знайдемо оптимальне значення частоти обслуговування m_{opt} . Це завдання може бути визначено шляхом дослідження виразу (7) на екстремум, тобто

розв'язанням рівняння: $\frac{dK_{EG}}{dm} = 0$. Після диференціювання отримаємо

$$\frac{1+b}{m^2} \cdot (1+b+a \cdot m) \cdot \exp\left[-\left(\frac{1+b}{m}\right)\right] - a \cdot \exp\left[-\left(\frac{1+b}{m}\right)\right] = 0,$$

$$m \neq 0, 1+b \neq 0, \exp\left[-\left(\frac{1+b}{m}\right)\right] = 0,$$

після нескладних перетворень розв'язуючи це рівняння, знаходимо

$$m_{opt} = \frac{1+b}{2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4}{a}}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{t_B}{T_{0ПФ}}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{II}}}\right).$$

З огляду на те, що $m_{opt} = \frac{T_{0ПФ} + t_B}{t_{Popt}}$, з останнього виразу отримуємо формулу для оптимального значення періоду технічного обслуговування

$$t_{Popt} = \frac{2 \cdot T_{0ПФ}}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{II}}}}. \quad (8)$$

Звичайно для СЕП виконується співвідношення $T_{0ПФ} \gg t_{II}$. Тому вираз (8)

без великих похибок можна перетворити до

$$\text{вигляду } t_{Popt} \approx \frac{2 \cdot T_{0ПФ}}{\sqrt{4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{II}}}}.$$

Після визначення оптимального періоду технічного обслуговування можна знайти за даних умов максимальне значення коефіцієнта експлуатаційної готовності. Для цього у вираз (5) підставимо вираз (8):

$$K_{EGmax} = \frac{t_{\Sigma раб}}{t_{\Sigma раб} + t_{\Sigma Пopt} + t_{\Sigma B}} \cdot \exp\left(-\frac{2}{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{T_{0ПФ}}{t_{II}}}}\right)$$

$$t_{\Sigma Popt} = \frac{T_{0ПФ} + t_B}{t_{Popt}} \cdot t_{II}. \quad (9)$$

З виразу (9) можливий очевидний висновок про те, що оптимальна періодичність проведення технічного обслуговування СЕП визначається надійністю системи (наробітком на відмову

T_0), а також середнім часом, затраченим на виконання одного технічного обслуговування t_{II} . Іншими словами, більш надійне обладнання (що має більше значення T_0) треба обслуговувати рідше.

Крім того, як випливає з виразу (9), чим більше витрачається часу на одне обслуговування, тим, мабуть, можна більш глибоко проконтролювати обладнання і запобігти більшим відмовам, а отже, зростає і період обслуговування.

При виборі періодичності технічного обслуговування з умови максимальної імовірності виявлення несправності з досвіду експлуатації встановлено, що будь-який технічний пристрій може знаходитися в трьох станах: справному (несправності нема), несправному (у пристрої виникла несправність, але відмови не наступило) і непрацездатному (пристрій відмовив і ремонтується). Два перших стани (справний і несправний) є працездатними. У випадку, коли несправність передусе відмові, між значеннями часу виникнення несправності і відмови (чи між значеннями відповідних параметрів потоків несправностей і відмов), може існувати вірогідна чи функціональна залежність. Розглянемо докладніше вірогідну залежність. Процес розвитку відмови розбивається на дві стадії. На першій стадії з моменту початку роботи $t = 0$ технічного пристрою розвивається несправність, що виявляється у випадковий момент часу T_1 .

З цього моменту починає розвиватися друга стадія, і в момент часу T_2 виникає відмова. Припустимо, що ТО проводиться з постійною періодичністю T_p , що не залежить від кількості відмов, що виникли за період між обслуговуваннями.

З початку експлуатації ($t = 0$) до моменту проведення першого ТО ($t = T_p$) параметр потоку відмов для всіх $t < T_p$ дорівнює:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) \cdot f(t-\tau) d\tau, \quad (10)$$

де $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ – щільність розподілу випадкового часу безвідмовної роботи пристрою (обладнання).

Значення $f(t)$ можна визначити через щільність розподілу часу розвитку несправності і часу розвитку відмови (часу розвитку першої і другої стадії), тобто

$$f(t) = \int_0^t f_1(\tau) \cdot f_2(t-\tau) d\tau, \quad (11)$$

де $f_1(t) = \frac{dF_1(t)}{dt}$ – щільність розподілу часу T_1 виникнення несправності;

$f_2(t) = \frac{dF_2(t)}{dt}$ – щільність розподілу часу T_2 розвитку відмови.

Знайдемо, як зміняться параметр потоку відмов у результаті проведення першого ТО. Крім того, визначимо верхню межу терміну проведення цього ТО, при якому параметр потоку відмов набуває мінімального значення (якщо термін призначити менше, то надійність обладнання не підвищиться, а готовність його знизиться). При проведенні ТО відмови усуваються шляхом виявлення й усунення несправностей. Отже, при виконанні цих робіт виробляється керуючий вплив на подальше поведіння функції $\omega(t)$. Для того щоб оцінити дію цього керуючого впливу на $\omega(t)$, розглянемо дві несумісні події, що виникають у момент початку виконання першої несправності; позначимо імовірність цієї події через $1 - P_n(t_{p1})$, несправність має місце й імовірність цієї події дорівнює $P_n(t_{p1})$. Відповідно до цих двох подій можна виділити дві складові потоку відмов $\omega_1(t)$ і $\omega_2(t)$ протягом часу роботи між першим і другим ТО. Перша подія відповідає випадку, коли керуючий

вплив на потік відмов не впливає. Тому перша складова потоку відмов дорівнює

$$\omega_1(t) = [1 - P_H(t_{p1})] \cdot \omega(t), \quad (12)$$

де $\omega(t)$ – параметр потоку відмов для випадку, коли ТО не проводиться.

Друга ж подія відповідає випадку, коли керуючий вплив був здійснений – несправність була виявлена й усунута.

Друга складова потоку відмов при $t_2 < t < t_{p1}$ дорівнює

$$\omega_2(t) = P_H(t_{p1}) \cdot \omega(t - t_{p1}), \quad (13)$$

де $t_2 = t_{p1} + t_{p2}$; t_{p2} – термін експлуатації (наробітку) між першим і другим ТО.

Таким чином, після проведення першого ТО виникає потік відмов з параметром

$$\varpi(t) = \omega_1(t) + \omega_2(t) = [1 - P_H(t_{p1})] \cdot \omega(t) + P_H(t_{p1}) \cdot \omega(t - t_{p1}) = \omega(t) - P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})] \quad (14)$$

На рис. 2 показано характер зміни функції $\varpi(t)$ за наробітком. Пунктиром

показана функція $\omega(t)$ для випадку, коли ТО не проводиться.

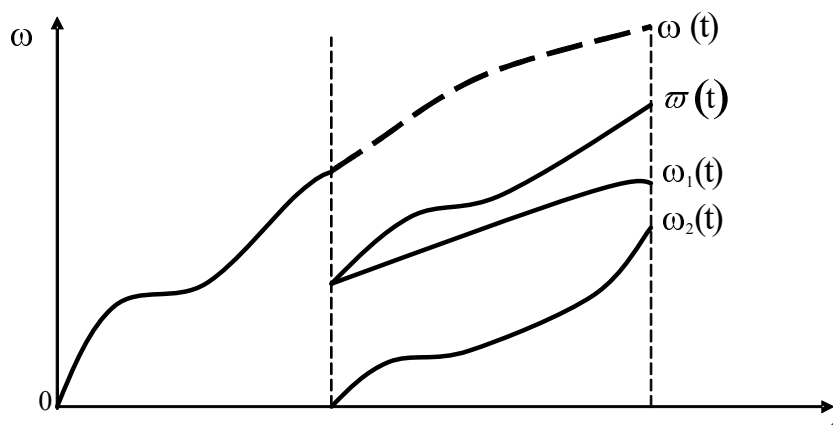


Рис. 2. Графік «розрідженого» потоку відмов

На рис. 2 позначено

$$\omega_1(t) = [1 - P_H(t_{p1})] \cdot \omega(t);$$

$$\omega_2(t) = P_H(t_{p1}) \cdot \omega(t - t_{p1}).$$

Таким чином, після проведення ТО виникає «розріджений» потік відмов з параметром $\varpi(t)$. Це розрідження пояснюється тим, що при проведенні ТО усуваються несправності, що виникли за період між обслуговуваннями. З формули (13)

випливає, що чим більше значення добутку $P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})]$, тим більше розрідження потоку відмов і менше значення його параметра $\varpi(t)$. Отже, для визначення терміну першого ТО, при якому значення параметра розрідженого потоку відмов мінімальне, необхідно виконати диференціювання виразу $P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})]$, прирівняти похідну до нуля і розв'язати відносно t_{p1} отримане рівняння. Однак на

практиці зазначені обчислення викликають значні труднощі і їх доцільно спростити. З цією метою проаналізуємо, наскільки відрізняються значення $t_{p1}^{(1)}$ і $t_{p1}^{(2)}$. При значеннях $t_{p1}^{(1)}$ і $t_{p1}^{(2)}$ імовірності $P_H(t_{p1}) \cdot [\omega(t) - \omega(t - t_{p1})]$ і $P_H(t_{p1})$ – максимальні. У таблиці наведено значення різниці $\Delta t = t_{p1}^{(1)} - t_{p1}^{(2)}$ для деяких розподілів часу T_1 і T_2 . З таблиці видно, що для всіх розподілів Δt не перевищує кілька відсотків (практично не перевищує точність розрахунку). Таким чином, з достатньою для практики точністю термін проведення першого ТО, при якому $\omega(t) = \min$, можна визначати з умови $P_H(t_{p1}) = \max$.

Визначимо залежність імовірності $P_H(p1)$ від терміну проведення першого ТО t_{p1} , при цьому вважаємо, що несправність буде мати місце в технічному пристрої до моменту проведення першого ТО у двох таких випадках: до початку проведення ТО виникла несправність, але не наступила відмова; пристрій відмовив протягом періоду між обслуговуваннями і його було відновлено; з моменту часу $t = t_p$ до початку проведення ТО в пристрої з'явилася несправність, але не наступила відмова. Позначивши

імовірності цих двох випадків відповідно через $P_{H,0}(t_{p1})$ і $P_1(t_{p1})$, запишемо

$$P_H(t_{p1}) = P_{H,0}(t_{p1}) + P_1(t_{p1}). \quad (15)$$

Визначимо імовірність $P_1(t_{p1})$. Для цього розглянемо інтервал часу $[\tau, \tau + d\tau]$, що передує початку проведення першого ТО. Імовірність відмови технічного пристрою протягом цього інтервалу часу дорівнює $\omega(\tau) d\tau$. Імовірність того, що протягом часу $(t_{p1} - \tau)$ з'явиться несправність і не наступить відмова, дорівнює $P_{H,0}(t_{p1} - \tau)$. Тоді елемент імовірності $dP_1(\tau)$ дорівнює добутку $dP_1(\tau) = \omega(\tau) \cdot P_{H,0}(t_{p1} - \tau) dt$. Підсумовуючи по усіх τ від 0 до t_{p1} , одержимо

$$P_1(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} \omega(\tau) \cdot P_{H,0}(t_{p1} - \tau) d\tau. \quad (16)$$

Підставляючи вираз (16) у вираз (15), одержимо рівняння для визначення імовірності наявності несправності в технічному пристрої до початку проведення першого ТО:

$$P_H(t_{p1}) = P_{H,0}(t_{p1}) + \int_0^{t_{p1}} \omega(\tau) \cdot P_{H,0}(t_{p1} - \tau) d\tau. \quad (17)$$

Звичайно параметр потоку відмов малий, а у виразі (17) до того ж використовується параметр розрідженого потоку відмов. Тому другим додатком можна знехтувати (розрахунки показують, що помилка в цьому випадку не перевищує декількох відсотків). Тоді $P_H(t_{p1}) \approx P_{H0}(t_{p1})$. Повторюючи мірку-

вання, аналогічні описаній вище для $P_H(t_{p1})$, запишемо

$$P_{H,0}(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} [1 - F_2(t_{p1} - \tau)] \cdot f_1(\tau) d\tau, \quad (18)$$

де $F_2(\tau)$ – функція розподілу часу T_2 другої стадії розвитку відмови.

Таблиця

Визначення інтервалу Δt , %

Розподілення і його щільність	T_{cp}	σ	$\frac{T_{cp}}{\sigma}$	$t_{p1}^{(2)}$						
				0,125	0,25	0,375	0,5	0,575	0,75	0,875
Експоненціальне $\lambda \cdot e^{-\lambda t}$	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda}$	1	+1,6	+1,4	+0,8	0	-0,79	-1,39	-1,58
Рівномірне $\frac{1}{\beta - \alpha}$	При $\alpha = 0$	$\beta/2$		+4,9	+4,5	+3,0	0	-2,9	-4,3	-4,7
Нормальне $\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(t-m)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right)$	1		1	+6,0	+5,0	+4,1	0	-4,1	-4,9	-5,8
	m	σ	0,5	+4,5	+4,0	+2,8	0	-2,7	-3,8	-4,4
			0,33	+2,6	+2,1	+1,5	0	-1,5	-1,8	-2,1
Гамма-розподіл $\frac{\lambda^m}{\Gamma(m)} \cdot t^{m-1} \cdot e^{-\lambda t}$	$\frac{m}{\sigma}$	$\frac{m}{\sigma^2}$	0,5	+1,5	+0,8	+0,4	0	-0,4	-0,65	-1,3
			0,33	+1,2	+0,6	+0,3		-0,3	-0,55	-1,1
Розподіл Вейбулла $\alpha \cdot C \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-Ct^\alpha}$	$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	$\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$	0,5	+1,4	+0,7	+0,4	0	-0,4	-0,6	-1,2
	$\frac{1}{C^\alpha}$	$\frac{2}{C^\alpha}$	0,33	+1,2	+0,6	+0,3	0	-0,3	-0,55	-1,1

Якщо між значеннями часів T_1 і T_2 існує кореляційна залежність, то

формула (18) буде мати такий вигляд

$$P_{n,0}(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} \left\{ 1 - F_2 \cdot \left[\frac{(t_{p1} - \tau)}{\tau} \right] \right\} \cdot f_1(\tau) d\tau, \quad (19)$$

де $F_2\left(\frac{t}{\tau}\right)$ – умовна функція розподілу часу другої стадії розвитку відмови за умови, що час T_1 набув значення τ .

розподіли з параметрами λ_1 і λ_2 відповідно, параметр потоку відмов $\omega(t)$ буде визначатися таким виразом:

$$\omega(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \left[1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \right]. \quad (21)$$

Раніше було зазначено, що чим більше значення імовірності, тим більше розрідження потоку відмов і менше значення $\overline{\omega}_t$. Розглянемо, як вимірюються значення функції $P_{n,0}(t_{p1})$ при зміні терміну проведення першого ТО. Безпосередньо з формул (18) і (19) випливає, що при $t_{p1} = 0$ і при $t_{p1} = \infty$ $P_{n,0}(0) = P_{n,0}(\infty) = 0$. Це фізично пояснюється тим, що при $t_{p1} = 0$ ще не з'явилися несправності, а при $t_{p1} = \infty$ технічний пристрій відмовляє до початку проведення першого ТО. Оскільки функція $P_{n,0}(t_{p1})$ – невід'ємна і безупинна, то в інтервалі $[0, \infty]$ існує точка максимуму. Отже, існує такий термін проведення ТО t_{p1} , при якому імовірність $P_{n,0}(t_{p1}) = \max$ і значення розрідженого параметра потоку відмов мінімальне. Цей термін може бути знайдений як найменший позитивний корінь рівняння

$$\frac{dP_{n,0}(t_{p1})}{dt_{p1}} = 0. \quad (20)$$

У тому випадку, коли рівняння (20) не має аналітичного рішення, термін t_{p1} знаходиться безпосередньо з графіка функції $P_{n,0}(t_{p1})$. У випадку, якщо часи T_1 і T_2 незалежні і мають експонентні

На рис. 3 показана залежність параметра потоку відмов за наробітком. Якщо ТО не проводиться (крива 1), то $\omega(t)$, за виразом (21), зростає і наближається в межі при $t \rightarrow \infty$ до $\frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$. Якщо ТО

проводиться з періодичністю T_p , то після кожного ТО значення параметра потоку відмов стає рівним нулю, а в період між обслуговуваннями змінюється відповідно до виразу (21). Така функціональна залежність наведена на рис. 3 (крива 2). Для того щоб краще зрозуміти фізичний зміст імовірності $P_{n,0}(t_{p1})$, розглянемо три ситуації, можливі в момент початку проведення першого ТО. Перша ситуація – за період між обслуговуваннями не виникла несправність. Друга ситуація – за період між обслуговуваннями виникла несправність, але відмова не сталася. Тоді існує деякий момент часу виникнення відмови для випадку, якби ТО не проводилося. Третя ситуація – протягом періоду між обслуговуваннями наступила перша відмова. Позначимо імовірності зазначених вище ситуацій через $P_{n,0}(t_{p1})$, $P_{n,0}(t_{p1})$, $P_0(t_{p1})$ відповідно. Очевидно, що всі три ситуації утворюють повну групу подій:

$$P_{n,0}(t_{p1}) + P_{n,0}(t_{p1}) + P_0(t_{p1}) = 1. \quad (22)$$

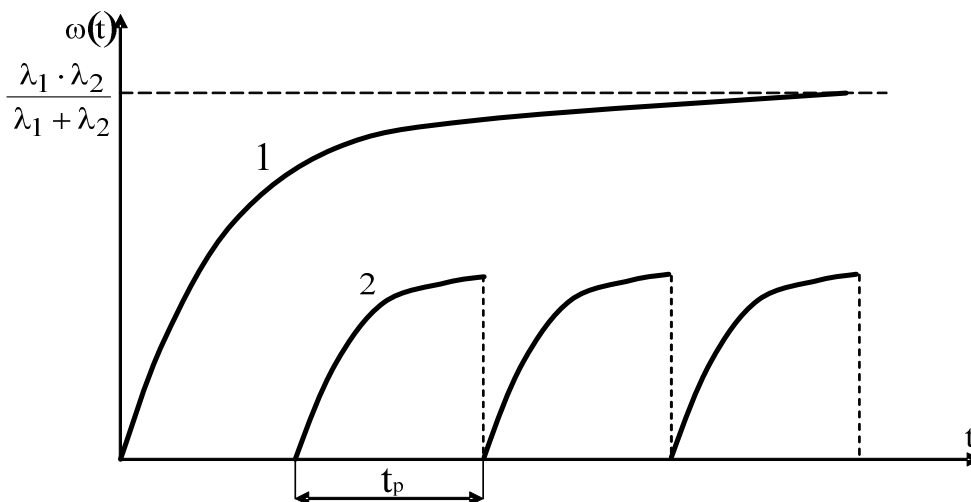


Рис. 3. Графік зміни параметра потоку відмов

Неважко побачити, що сума ймовірностей двох перших подій дорівнює значенню функції надійності при $t = t_{p1}$, тобто $P_{н,0}(t_{p1}) + P_{н,0}(t_{p1}) = P(t_{p1})$, а ймовірність третьої функції – значенню функції ненадійності, тобто

$Q(t_{p1}) = P_0(t_{p1})$. Визначимо залежність ймовірностей $P_{н,0}(t_{p1}), P_0(t_{p1})$ від щільності розподілу часів виникнення несправностей і відмов. Очевидно, що ймовірність першої ситуації визначається виразом

$$P_{н,0}(t_{p1}) = 1 - F_1(t_{p1}) = 1 - \int_0^{t_{p1}} f_1(\tau) d\tau. \quad (23)$$

Ймовірність третьої ситуації дорівнює

$$P_0(t_{p1}) = F(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} f(\tau) d\tau. \quad (24)$$

Формули (22), (23) та (24) можуть бути використані для визначення ймовірності $P_{н,0}(t_{p1})$ при всіх трьох типах залежностей часів T_1 і T_2 , при цьому порядок обчислень такий: знаходять щільність розподілу $f(t)$ часу; за формулами (23) і (24) визначають ймовірності $P_{н,0}(t_{p1})$ і $P_0(t_{p1})$; за формулою (22) знаходять

шукану ймовірність $P_{н,0}(t_{p1})$. Очевидно, що функція $P_{н,0}(t_{p1})$ – монотонно спадна, а функція $P_0(t_{p1})$ – неспадна. Характер зміни ймовірностей усіх трьох ситуацій наведено на рис. 4. З рис. 4 видно, що функція $P_{н,0}(t_{p1})$ в районі максимуму змінюється дуже полого, що дає можливість зсуву

терміну проведення ТО від оптимального значення і призначення допуску на цей термін.

З рис. 4 видно також, що ймовірність ситуації $P_0(t_{p1})$ є найбільш небезпечною, при $t = t_{p1}$ вона може мати значну величину.

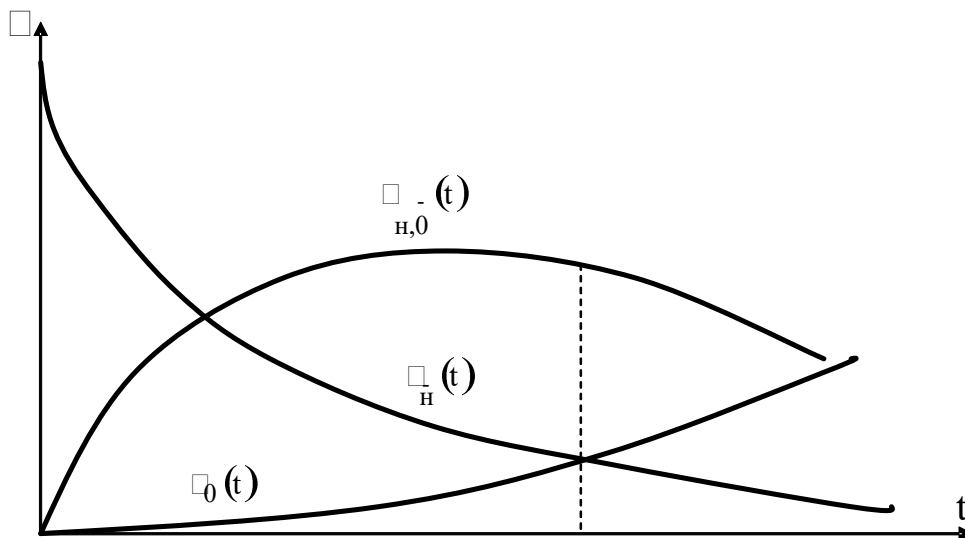


Рис. 4. Залежності ймовірностей $P_0, P_{H,0}, P_H$ від терміну проведення ТО t_p

Тому доцільно після визначення терміну t_{popt} обчислити $P_0(t_{popt})$ і скоригувати $P_0(t_{popt})$ з урахуванням цього значення. Крім того, якщо потрібно забезпечити ймовірність появи відмови не вище заданої $P_{зад}$, то термін першого ТО

повинний знаходитися з умови $P_0(t_{p1}) < P_{зад}$. Розглянемо випадок, коли значення часу T_1 і T_2 незалежні і мають експонентний розподіл з параметрами λ_1, λ_2 відповідно. При цьому вираз (21) запишеться у вигляді

$$P_{H,0}(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} e^{-\lambda_2(t_{p1}-\tau)} \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau.$$

Обчислюючи інтеграл, одержимо

$$P_{H,0}(t_{p1}) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot (e^{-\lambda_2 t_{p1}} - e^{-\lambda_1 t_{p1}}). \tag{25}$$

Для визначення оптимального терміну проведення ТО знайдемо корінь рівняння (20). Після перетворення одержимо

$$t_{p1opt} = \frac{\ln \lambda_1 - \ln \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad \text{чи} \quad t_{p1opt} = \frac{\phi(\rho)}{\lambda_2}, \quad (26)$$

де $\rho = \frac{\lambda L1}{\lambda_2}$; $\phi(\rho) = \frac{\ln \rho}{\rho - 1}$.

Визначимо імовірності двох інших ситуацій, можливих у момент початку виконання першого ТО: імовірність того, що за період між обслуговуваннями не виникне несправність, за виразом (26), дорівнює

$$P_{n,0}^-(t_{p1}) = e^{-\lambda_1 t_{p1}}. \quad (27)$$

Визначимо імовірність виникнення відмови $P_0(t_{p1})$. Підставивши відповідні функції у вираз (24), одержимо

$$P_{n,0}^-(t_{p1}) = \int_0^{t_{p1}} [1 - e^{-\lambda_1(t_{p1}-\tau)}] \cdot \lambda_1 \cdot e^{-\lambda_1 \tau} d\tau.$$

Обчисливши інтеграл, маємо

$$P_0(t_{p1}) = 1 - e^{-\lambda_1 t_{p1}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot e^{-\lambda_1 t_{p1}} \cdot [1 - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)t_{p1}}]. \quad (28)$$

При практичних розрахунках може бути також застосована отримана з виразу (22) формула

$$P_0(t_{p1}) = 1 - P_{n,0}^-(t_{p1}) - P_{n,0}^-(t_{p1}). \quad (29)$$

Підставивши вираз (26) у вирази (25) і (27), після перетворень одержимо

$$P_{n,0}^- = e^{-\rho \phi(\rho)}; \quad (30)$$

$$P_{n,0}^- = \frac{\rho}{\rho - 1} \cdot (e^{-\phi(\rho)} - e^{-\rho \phi(\rho)}). \quad (31)$$

Для обчислення імовірності P_0 можна скористатися виразом (29). Як показано раніше, для розрахунку оптимальних термінів проведення ТО необхідно знати щільність розподілу $f_1(t)$ і $f_2(t)$, а для розрахунку оптимальної періодичності (у стаціонарному режимі експлуатації) – параметри $\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{T_{cp}}$; $\lambda_2 = \frac{1}{T_{cp}}$. Вихідні дані

для одержання $f_1(t)$, $f_2(t)$ $\bar{\lambda}_1$ (чи \bar{T}_{cp1}) і λ_2 (чи T_{cp2}) можуть бути отримані в результаті проведення спеціальних досліджень при реальній експлуатації. За статистичними даними за обстежуваний період експлуатації конкретних зразків обладнання можна підрахувати сумарну кількість $n_1^{(1)}$ несправностей визначеного типу, виявлених при проведенні ТО; кількість відмов n , яким передують несправності розглянутого типу. Несправності передують відмовам, тому загальна кількість несправностей, що проявилися в пристроях (агрегатах) за цей термін експлуатації, дорівнює $n_1 = n^{(1)} + n$. За цей же термін експлуатації відомо наробіток t_n усіх N обстежуваних виробів. Використовуючи ці дані, можна визначити оцінки математичних очікувань:

- часу настання несправності

$$\bar{T}_{cp}^* = \frac{t_n}{n_1} = \frac{t_n}{n_1^{(1)} + n}; \quad (32)$$

- часу виникнення відмови

$$T_{cp}^* = \frac{t_N}{n}. \quad (33)$$

Скориставшись виразом

$$T_{cp}^* = \bar{T}_{cp1}^* + T_{cp2}^*, \text{ за відомими значеннями}$$

T_{cp}^* і \bar{T}_{cp1}^* знаходимо оцінку для математичного очікування другої стадії розвитку відмови:

$$T_{cp2}^* = T_{cp}^* - \bar{T}_{cp1}^* = \frac{n_1^{(1)} \cdot t_n}{n \cdot (n_1^{(1)} + n)}. \quad (34)$$

Знаючи значення T_{cp}^* і \bar{T}_{cp} , визначаємо оцінки відповідних інтенсивностей, необхідних для знаходження оптимального періоду ТО:

$$\bar{\lambda}_1^* = \frac{1}{\bar{T}_{cp1}^*} = \frac{n_1^{(1)} + n}{t_N}; \quad (35)$$

$$\lambda_2^* = \frac{1}{T_{cp2}^*} = \frac{n(n_1^{(1)} + n)}{n_1^{(1)} \cdot t_n}.$$

Однак через недостатньо великий обсяг спостережень можливі випадкові помилки у визначенні середніх значень часу. Тому варто оцінювати точність цих оцінок за допомогою довірчих інтервалів. Оскільки при експлуатації наробіток t_N – фіксований, то випадкові числа n_1 несправностей і n відмов розподілені за законом Пуассона. Таким чином, оцінку точності формул (32) і (33) можна дати так само, як і для випадкової кількості подій, розподілених за законом Пуассона, при одержанні результатів декількох серій досвідів. При оцінюванні точності характеристик звичайно задаються значенням довірчої імовірності $\alpha=0,8-0,95$.

Довірчі границі для \bar{T}_{cp} і T_{cp} визначають за формулами:

$$T_{1n} = \frac{t_N \cdot r_2}{n_1} = r_2 \cdot \bar{T}_{cp1}^* \quad T_{16} = \frac{t_N \cdot r_1}{n_1} = r_1 \cdot \bar{T}_{cp1}^*, \quad (36)$$

де Γ_1, Γ_2 – коефіцієнти, визначені з роботи [11] за параметрами $\alpha_1, n_1(\alpha, n)$ розподілу Пуассона.

Таким чином, послідовність проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО зводиться до такого:

1. Знаходять інтенсивності, що відповідають середнім значенням часів виникнення несправності і другої стадії розвитку відмови:

$$\bar{\lambda}_1 = \frac{1}{T_{cp1}}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_{cp2}}. \quad (37)$$

$$P_{n,0}^-(t_p) = \frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}_1 - \lambda_2} \cdot \left(e^{-\lambda_2 t_p} - e^{-\bar{\lambda}_1 t_p} \right); \quad P_n^-(t_p) = e^{-\bar{\lambda}_1 t_p};$$

$$P_0(t_p) = 1 - P_n^-(t_p) - P_{n,0}^-(t_p). \quad (39)$$

4. На основі аналізу отриманого значення $t_{p_{opt}}$ графіків функцій $P_n^-(t_{p1}), P_{n,0}^-(t_{p1}), P_0(t_{p1})$ і особливостей організації і виконання ТО приймають остаточне рішення щодо періодичності ТО.

При виборі періодичності технічного обслуговування з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання особливістю роботи обладнання СЕП є те, що частину часу воно працездатне і виконує свої функції (готове до застосування чи включено в роботу), а іншу частину часу воно знаходиться в несправному чи непрацездатному стані (знаходиться в режимі технічного обслуговування). Крім того, після закінчення періоду між обслуговуваннями витрачається певний час на проведення технічного обслуговування.

Частка часу простою обладнання протягом періоду між обслуговуваннями

2. Обчислюють значення періодичності $t_{p_{opt}}$ ТО, при якій забезпечується найбільше розрідження потоку відмов (максимум імовірності $P_{n,0}^-(t_{p1})$),

$$t_{p_{opt}} = \frac{\ln \bar{\lambda}_1 - \ln \lambda_2}{\bar{\lambda}_2 - \lambda_2} = \frac{\phi(\rho)}{\lambda_2}, \quad (38)$$

де $\rho = \frac{\bar{\lambda}_1}{\lambda_2}$.

3. Будують графіки функцій

може бути оцінена так званим коефіцієнтом непрацездатного стану обладнання

$$K_H(t_{pi}) = \frac{\sum_{j=1}^n t_{bij} + t_{pi}}{t_{pi} + t_{\Pi i}}, \quad (40)$$

де t_{bij} – час, затрачуваний на усунення j -ї несправності (ушкодження, відмови) в i -му періоді між обслуговуваннями;

n – кількість виявлених усунутих несправностей (ушкоджень, відмов) протягом i -го періоду між обслуговуваннями;

$t_{\Pi i}$ – тривалість i -го ТО;

t_{pi} – величина i -го періоду між обслуговуваннями.

Із виразу (40) випливає, що коефіцієнт непрацездатного стану являє собою відношення сумарного часу усунення несправностей (ушкоджень, відмов) за i -й період між обслуговуваннями до

загального часу проведення і-го ТО та і-го періоду між обслуговуваннями. З визначення коефіцієнта непрацездатного стану також випливає, що максимальну готовність має те обладнання, у якого значення $K_H(t_{pi})$ – мінімальне. Зменшення коефіцієнта $K_H(t_{pi})$ можливо за рахунок збільшення значення періоду між обслуговуваннями і скорочення часу, затраченого на проведення ТО. Однак слід зазначити, що час, який відводиться на проведення ТО, залежить від таких факторів: обсягу технічного обслуговування; кількості обслуговуючого персоналу і його кваліфікації; складу засобів, що залучаються. Оскільки обсяг і порядок виконання ТО планується заздалегідь, то час, що відводиться на його виконання, є цілком визначеною величиною і залишається постійним для наступних обслуговувань. Тому надалі будемо вважати t_p величиною постійною, що дорівнює $t_p = t_{TO}$. Величина періоду між обслуговуваннями t_{pi} може змінюватися в найбільших межах. Однак при цьому варто мати на увазі, що при зменшенні t_{pi} буде значно скорочуватися час, затрачений на усунення несправностей (ушкоджень, відмов), що виявляються протягом періоду між обслуговуваннями. При збільшенні t_{pi} , навпаки, час на усунення несправностей і відмов буде збільшуватися. У зв'язку з цим не є можливим однозначно визначити тривалість періоду між обслуговуваннями, при якій значення коефіцієнта $K_H(t_{pi})$ буде мінімальним. Таким чином, для розв'язання зазначеної задачі необхідно знайти оптимальну величину t_{pi} , що відповідає мініимальному значенню коефіцієнта непрацездатного стану. Для розв'язання поставленої задачі введемо такі припущення: будемо вважати, що в межах періоду між обслуговуваннями кількість відмов в одиницю часу знаходиться в прямій пропорційній залежності від часу

експлуатації t , тобто $\bar{\lambda}(t) = q \cdot t$; кількість раптових відмов в одиницю часу залишається величиною постійною в усі періоди між обслуговуваннями і рівною $\lambda_b(t) = P$; сумарний час відновлення обладнання за один період між обслуговуваннями є випадковою величиною, що дорівнює її математичному

очікуванню $M(t) = T_B \cdot \int_0^{t_i} \bar{\lambda}(t) dt$, причому

$\bar{\lambda}(t) = \bar{\lambda}_n(t) + \bar{\lambda}_e(t)$ є сумарною кількістю поступових і раптових відмов в одиницю часу. Усі періоди між обслуговуваннями приймаємо рівними незалежно від тривалості експлуатації обладнання. Це означає, що в процесі проведення ТО обладнання відновлюється до рівня нового. З урахуванням зроблених припущень випливає, що математичне очікування часу усунення несправності обладнання дорівнює

$$M(t_p) = T_B \cdot \int_0^{t_p} (p \cdot q \cdot t) dt. \quad (41)$$

Підставляючи значення $M(t_p)$ у формулу (36), одержимо вираз для коефіцієнта $K_H(t_p)$:

$$K_H(t_p) = \frac{T_B \cdot \int_0^{t_p} (p \cdot q \cdot t) dt + T_{TO}}{t_p + T_{TO}}. \quad (42)$$

Після диференціювання виразу (42), прирівнявши похідну $K'_H(t_p)$ до нуля і розв'язуючи отримане рівняння відносно t_p , знаходимо оптимальне значення періоду між обслуговуваннями з умови мініимального значення коефіцієнта непрацездатного стану:

$$t_{P_{opt}} = T_{TO} \left[\sqrt{1 + 2 \cdot \left(\frac{1 - p \cdot T_B}{q \cdot T_B \cdot T_{TO}} \right)} - 1 \right]. \quad (43)$$

Висновки. Визначення періодичності ТО на підставі результатів періодичного контролю параметрів обладнання і його елементів дозволяє визначити найбільш доцільний термін проведення ТО, а також елементи, профілактична заміна яких найбільш доцільна. Отримано математичні співвідношення для вибору періодичності технічного обслуговування з умови максимальної ймовірності виявлення несправності. Розроблено алгоритм послідовності проведення розрахунку оптимальних термінів проведення ТО.

Запропоновано методику вибору періодичності ТО, за якою з умови мінімального коефіцієнта непрацездатного стану обладнання отримано співвідношення, з якого випливає, що величина періоду між обслуговуваннями визначається часом обслуговування T_{TO} , середнім часом відновлення працездатності обладнання при одному відмовленні T_B , інтенсивністю раптових відмов p і коефіцієнтом постійних відмов q .

Список використаних джерел

1. ЦЕ-0045. Обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць технічне обслуговування та ремонт привила №441-Ц/од [Текст]. – К., 2014. – 120 с.
2. Gils, H. C. Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe [Text] / H. C. Gils // Energy. – 2017. – Vol. 123. – P. 173-188.
3. Lampasi, A. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system [Text] / A. Lampasi // Fusion Engineering and Design. – 2017. – Vol. 135. – P. 168-179.
4. Kim, S. Offset-Free Model Predictive Control for Output Voltage Regulation of Three-Phase Inverter for Uninterruptible Power Supply Applications [Text] / S. Kim, C. Park, Y. Lee // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47. – P. 129-134.
5. Супрун, О. Д. Дослідження перехідних режимів роботи установок гарантованого живлення блочно-модульних тягових підстанцій [Текст] / О. Д. Супрун, О. В. Коваленко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 153. – С. 66-99.
6. Супрун, О. Д. Дослідження аварійних режимів роботи агрегатів безперебійного живлення блочно-модульних тягових підстанцій [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 77-84.
7. Супрун, О. Д. До питання впровадження джерел безперебійного живлення на тягових підстанціях при швидкісному русі [Текст] / О. Д. Супрун, Ю. О. Семененко, О. В. Ушкалов // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 169. – С. 129-141.
8. Цихалевский, И. С. Определение оптимальных параметров технологического процесса ремонта тягового подвижного состава [Текст] / И. С. Цихалевский, О. И. Ветлугина, М. М. Кудаяров // Вестник УрГУПС. – 2011. – Вып. 4(12). – С. 31–38.

9. Ящура, А. И. Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования [Текст] / А. И. Ящура. – М. : Энас, 2008. – 360 с.

10. ЦЕ-0009. Правила улаштування системи тягового електропостачання залізниць України. № 1010-ЦЗ [Текст]. – К., 2004. – 82 с.

Супрун Олександр Данилович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Семененко Олександр Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Семененко Юрій Олександрович, канд. техн. наук, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Кузьмін Станіслав Сергійович, магістрант, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Домарацький Вадим Ростиславович, магістрант, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Супрун Александр Данилович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Семененко Александр Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Семененко Юрий Александрович, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Кузьмин Станислав Сергеевич, магистрант, кафедра электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта.

Домарацький Вадим Ростиславович, магістрант, кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту.

Suprun Oleksandr Danylovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-74. E-mail: adsup@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8732-7609>.

Semenenko Oleksandr Ivanovyvch, PhD (Tech.), associate professor, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: semenoi@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8885-6783>.

Semenenko Yurii Oleksandrovivch, PhD (Tech.), Senior lecturer, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-3528>.

Kuzmin Stanislav Sergiyovych, master, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.

Domaratskyi Vadym Rostyslavovych, master, Department of Electric Power Industry, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 01.11.2018 р.

УДК 621.331:621.311.4.026

**РОЗПОДІЛЕННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ПО ДИСТАНЦІЯХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ШВИДКІСНОГО РУХУ**

Кандидати техн. наук О. І. Акімов, В. В. Панченко,
магістранти Л. В. Заїка, О. М. Панютін

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПО ДИСТАНЦИЯМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ СКОРОСТНОГО ДВИЖЕНИЯ**

Кандидаты техн. наук А. И. Акимов, В. В. Панченко,
магистранты Л. В. Заика, О. Н. Панютин

**DISTRIBUTION OF TRACTION SUBSTATIONS ON POWER SUPPLY DIVISIONS
WHILE IMPLEMENTING HIGH-SPEED OPERATION**

PhD (Tech.) O.I. Akimov, PhD (Tech.) V.V. Panchenko, masters L.V. Zaika, O.M. Paniutin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156417>

Досліджено процес розподілення тягових підстанцій на конкретній ділянці електропостачання при впровадженні швидкісного руху. Встановлено оптимальну відстань між тяговими підстанціями для цієї ділянки. Цей висновок підкріплений економічним розрахунком. Показано, що традиційна методика визначення довжини міжпідстанційної зони при впровадженні швидкісного руху дає завищені результати, тому вона має застосовуватись на швидкісних ділянках з коректуванням.

Ключові слова: розподілення тягових підстанцій, дистанція електропостачання, схема заміщення, тягова мережа, оптимальна відстань.

Исследован проект распределения тяговых подстанций на конкретном участке электроснабжения при внедрении скоростного движения. Установлено оптимальное расстояние между тяговыми подстанциями для этого участка. Этот вывод подкреплен экономическим расчетом. Показано, что традиционная методика определения длины межподстанционной зоны при внедрении скоростного движения дает завышенные результаты, поэтому она должна применяться на скоростных участках с коррекцией.

Ключевые слова: распределение тяговых подстанций, дистанция электроснабжения, схема замещения, тяговая сеть, оптимальное расстояние.

The research deals with the distribution of traction substations on the particular power supply section while implementing high-speed operation. The authors suggest variants of solving the task related to the distribution of traction substations on power supply divisions while implementing high-speed operation under the condition that the powers of traction substations are known. The optimal distance between traction substations for the particular section is defined. The task concerning the choice of the optimal distance between traction substations is solved on the grounds of the results of electrical calculations and modeling loads on the traction energy system applying the EWB program. The research is conducted for the double-track line 43 km long, electrified according to the system of 27kV alternating current. The characteristics of the electric train «Sokil» are used during the modelling, on their basis traction calculation is carried out, which results in changing the speed and consumption current of the train within the researched section.

Electric traction network is represented by apparent impedance of tracks and rods which include active R and inductive X resistances of these elements. The equivalent circuit of the double track section of the electric traction network is presented. Modelling of the zone between the traction substations is carried out for different length of the zone. The optimal distance between traction substations is defined on the grounds of this modelling. This conclusion is proved by the economical calculation. It is shown that the traditional methods for defining the length of the traction-to-traction zone while implementing high-speed operation provide overrated results, that is why they have to be employed on high-speed sections with adjustments.

Keywords: *distribution of traction substations, power supply division, equivalent circuit, electric traction network, optimal distance.*

Вступ. З розвитком швидкісного руху характер тягових навантажень і вихідні дані для проектування електрифікації залізниць змінилися, причому з підвищенням швидкості руху скоротився час переміщення тягового рухомого складу (ТРС) по фідерній зоні. При цьому висока встановлена потужність електровозів і електропоїздів, потрібна для досягнення максимальної швидкості, веде до виникнення піків навантажень. Цим навантаженням вже не можуть відповідати всі елементи тягових підстанцій, особливо трансформатори, розраховані на середньостатистичні навантаження [1].

Крім того, слід зазначити, що встановлене під час масової електрифікації залізниць електрообладнання морально і фізично застаріло і потребує заміни [2]. Зокрема 77 % тягових підстанцій експлуатуються більше 30 років.

З огляду на різні системи тягового електропостачання, відстані між тяговими підстанціями, інтенсивності графіків руху, технічні дані ТРС, параметри ліній, а також наявності нетягових споживачів зрозуміло, що потужностей тягових підстанцій в масштабі залізниць України буде безліч.

Тому виникає задача визначення потужностей тягових підстанцій для електрифікованих залізниць і розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання.

Проблема визначення потужностей тягових підстанцій потребує вирішення двох взаємопов'язаних задач: визначення дійсної потреби дистанцій

електропостачання в електричній енергії та створення тягових підстанцій, здатних виконати покладені на них функції.

При вирішенні другої задачі перш за все треба визначитися з потрібним рядом потужностей тягових підстанцій.

У даній статті розглядаються варіанти розв'язання задачі розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху за умови, що потужності тягових підстанцій відомі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянутий в роботі [1] метод найчастіше застосовується для наближених оцінок, наприклад при порівнянні проектів визначення навантажень тягових підстанцій, тобто для першої з двох сформульованих задач, яка в даній статті не розглядається.

Задачі, подібні до сформульованої, розглядалися у роботах [4, 5]. Загальним підходом у цих роботах є зведення до мінімуму річних експлуатаційних витрат і розв'язання задачі методом динамічного програмування.

Розглянуті в роботах [4, 5] моделі дають загальне уявлення про досліджуваний процес. Відмічаючи корисність цих досліджень, треба зазначити, що вони не відображують специфіку електропостачання ТРС, пов'язану з забезпеченням надійності та безперебійності його електропостачання енергією потрібної якості.

У роботі [6] розв'язується задача визначення ряду потужностей тягових

підстанцій за допомогою створених математичних моделей. Зазначено, що запропоновані раніше математичні моделі не враховують зазначену специфіку електропостачання ТРС, тому ці моделі допрацьовані з урахуванням зазначених вимог.

Зазначено також, що у випадках, коли застосування запропонованих математичних моделей для розв'язання задачі виявляється неможливим, доцільно використовувати імітаційні моделі, які дозволяють шляхом варіювання змінних знайти оптимальний варіант визначення ряду потужностей тягових підстанцій.

Практична реалізація зміни ряду потужностей тягових підстанцій у режимі реального часу залежно від вантажопотоку можлива за рахунок широкого застосування блоків контейнерно-модульного виконання [3].

У роботах [7, 8, 9] разом з іншими питаннями електрифікації залізниць розглядається і розподілення тягових підстанцій у загальних умовах.

Але у всіх цих роботах питання розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при

впровадженні швидкісного руху не розглядається.

Визначення мети та завдань дослідження. Мета дослідження – розподілення тягових підстанцій по дистанціях електропостачання при впровадженні швидкісного руху.

Завданнями дослідження є аналіз традиційної методики при встановленні оптимальної довжини міжпідстанційної зони для швидкісного руху та визначення довжини між тяговими підстанціями для конкретної ділянки залізниці.

Основна частина дослідження. Організація швидкісного руху потребує модернізації систем тягового електропостачання в напрямку їх підсилення.

На сьогодні існують проблеми з підсиленням систем електропостачання СЕП і пошуком шляхів їх вирішення. До таких шляхів (рис. 1) відносять збільшення перерізу проводів контактної мережі КМ, застосування тягової мережі з екранувальними та підсилювальними проводами, пристроїв компенсації реактивної потужності і т. п.



Рис. 1. Шляхи підсилення СЕП

Основана увага в даній статті приділена вибору оптимальної відстані між тяговими підстанціями ТП. Відстань між ними залежить від багатьох факторів: напруг на шинах підстанцій і в тяговій мережі, роду струму та ін. (рис. 2).

Задача розв'язується на основі результатів електричних розрахунків і моделювання за допомогою ЕОМ навантажень на систему тягового електропостачання з використанням програми EWB.

Об'єктом дослідження є двошляхова ділянка довжиною 43 км, електрифікована за системою змінного струму 27 кВ. При дослідженні були використані характеристики електропоїзда «Сокил», на базі яких проведено тяговий розрахунок, результатом якого є зміна швидкості і струму, що споживає поїзд уздовж зазначеної ділянки. Контактна мережа цієї ділянки виконана за формулою М120+МФ, а рейкова мережа – Р65 (Р75). Результати цього розрахунку, наприклад для L=39 км, наведені на рис. 3.

Отже, тягова мережа представлена повними опорами шляхів і рейок, які включають до свого складу активні R та

індуктивні X опори цих елементів. Параметри контактної мережі (КМ) мають такий вигляд:

$$R = r_0 \cdot l; X = x_0 \cdot l; L = \frac{X}{\omega}, \quad (1)$$

де r_0, x_0 – активний та індуктивний опори одного кілометра КМ;

l – довжина КМ;

L – індуктивність КМ;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота, де f – частота струму.

Схема заміщення одного кілометра тягової мережі має вигляд, показаний на рис. 4.

Відповідно визначаються параметри рейкового кола

$$R_p = r_{0p} \cdot l; X_p = x_{0p} \cdot l; L_p = \frac{X_p}{\omega}, \quad (2)$$

де r_{0p}, x_{0p} – активний та індуктивний опори одного кілометра рейки;

l – довжина рейок.

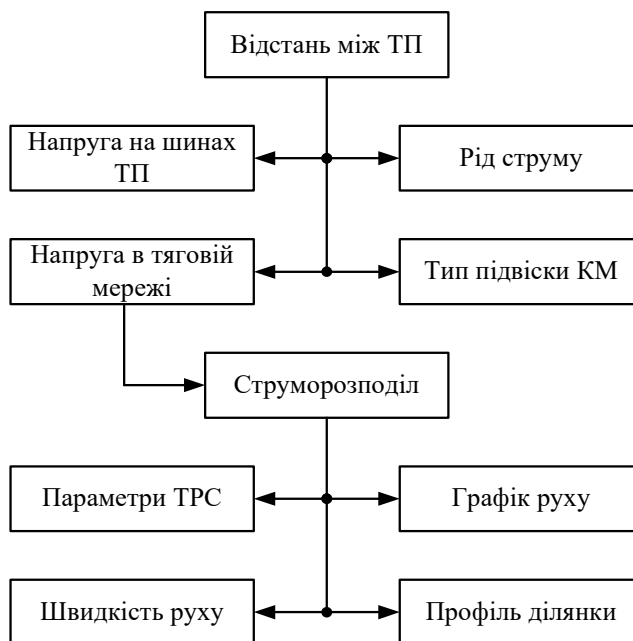


Рис. 2. Фактори, які впливають на вибір відстані між ТП

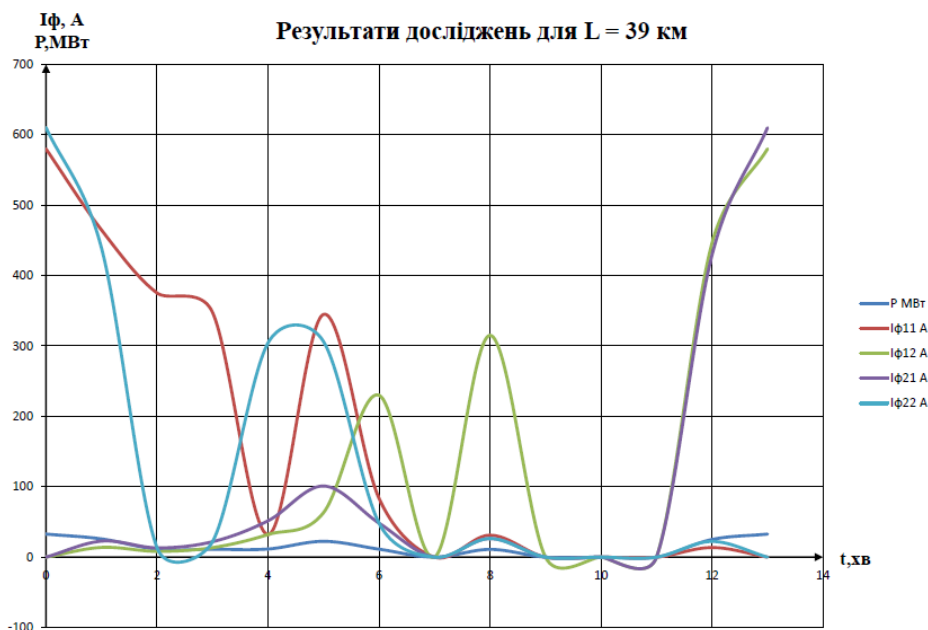


Рис. 3. Результати розрахунку споживаного струму та потужності

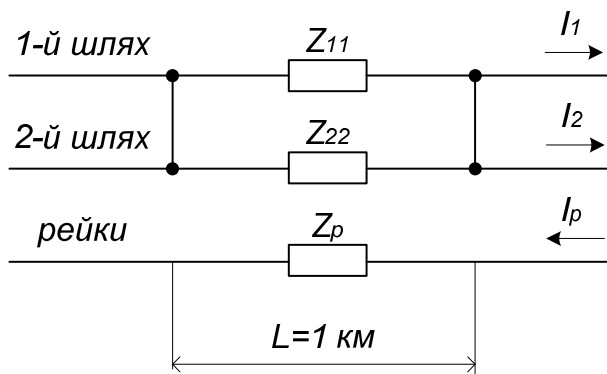


Рис. 4. Схема заміщення тягової мережі

Параметри взаємного впливу контактної мережі двох шляхів визначаються як

$$X_{12} = x_{OB} \cdot l; L_{12} = \frac{X_{12} \cdot l}{\omega}, \quad (3)$$

де x_{OB} – індуктивний опір взаємного впливу одиниці довжини КМ.

Для підстанції змінного струму внутрішній опір розраховується як

$$Z_{ТП} = \frac{Z_{ТР} \cdot Z_{ТР}}{Z_{ТР} + Z_{ТР}} + Z_i, \quad (4)$$

де $Z_{ТП}$ – повний опір тягової підстанції;
 $Z_{ТР}$ – повний опір трансформаторів, встановлених на підстанції;
 Z_i – повний опір системи зовнішнього електропостачання.

Моделювання міжпідстанційної зони проводилось для різної довжини цієї зони.

На підставі цього моделювання обрана оптимальна відстань між підстанціями.

Для кінцевого прийняття рішення з розподілення ТП потрібне економічне обґрунтування цих варіантів.

$$L_{ек} = \sqrt[3]{\frac{[K_n(1/T + a_n) + K_l(1/T + a_l) + K_{жс}(1/T + a_{жс}) + A_n \cdot S + D_n] \cdot U^2}{2 \cdot 8760 \cdot C \cdot K_T \cdot K_e \cdot r_y \cdot A_{cp}^2 \cdot S}}, \quad (5)$$

де K_n – вартість постійної частини тягових підстанцій;

K_l – вартість ліній передач;

$K_{жс}$ – вартість будівлі тягової підстанції;

T – термін окупності;

a – амортизаційні відрахування;

A_n – річні витрати енергії на власні потреби;

D_n – витрати на утримання за рік телекерованої тягової підстанції;

C – коефіцієнт, що враховує схему живлення контактної мережі;

S – вартість однієї кВт·год електроенергії;

U – номінальна напруга в контактній мережі;

K_T – коефіцієнт, що враховує витрати енергії в тягових трансформаторах;

K_e – коефіцієнт, що враховує нерівномірність тягового навантаження та організації руху;

r_y – складова повного опору петлі контактний провід – рейки, віднесеного до 1 км лінії;

A_{cp} – середньорічне електроспоживання на електричну тягу,

$$A_{cp} = 0,046 \frac{\sum \Sigma A_{vi} \cdot N_{vi}}{L}, \quad (6)$$

де A – електрична енергія, що споживається поїздом;

L – довжина ділянки;

N – кількість пар поїздів;

За мінімумом приведених витрат отримано такий вираз для економічної відстані між підстанціями

i – кількість перегонів;

v – кількість типів поїздів.

Для розглядуваної ділянки та характеристик електропотяга «Сокіл» отримана така розрахункова формула визначення економічної відстані між підстанціями:

$$L_{ек} = \sqrt[3]{\frac{(2,13 + 3,31 \cdot S) \cdot 10^{14}}{253864,8 \cdot A_{cp}^2 \cdot S}}. \quad (7)$$

Варіант розташування тягових підстанцій при середній оптимальній відстані між ними повинен порівнюватися з іншим варіантом при меншій кількості підстанцій. Виявлений при цьому більший економічний ефект визначає, у який бік слід змінювати кількість підстанцій і відстань між ними при подальшому порівнянні варіантів.

Така методика прийнята і при вирішенні питання про додаткові тягові підстанції (при великих міжпідстанційних зонах).

При визначенні оптимальної довжини міжпідстанційної зони існуюча методика вибору відстані між тяговими підстанціями [7, 8] дає завищені результати, тому для застосування на швидкісних ділянках руху вона без коректування не може бути використана.

З отриманих розрахунів випливає, що за витратами електроенергії і пропускною спроможністю оптимальною довжиною міжпідстанційної зони розглядаємої ділянки є 39 кілометрів.

Висновки

1. При порівнянні декількох варіантів довжин міжпідстанційної зони встановлена оптимальна відстань між тяговими підстанціями для конкретної ділянки залізниці. Цей вивід підкріплений економічним розрахунком.

2. Традиційна методика визначення довжини міжпідстанційної зони при впровадженні швидкісного руху дає завищені результати, тому вона повинна застосовуватись на швидкісних ділянках з коректуванням.

Список використаних джерел

1. Мощность тяговых подстанций для высокоскоростных линий [Текст] // Железные дороги мира. – 2002. – № 8. – С. 47-51.
2. Інструктивний лист міністерства транспорту та зв'язку України № 001Ц від 2006 р. – К., 2006. – 3 с.
3. Корниенко, В. В. Электрификация железных дорог [Текст] / В. В. Корниенко. – К., 2004. – С. 91.
4. Авакумов, В. Г. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операций [Текст] / В. Г. Авакумов. – К.: Вища школа, 1983. – 239 с.
5. Деодорица, Ю. С. Исследование операций в планировании и управлении [Текст] / Ю. С. Деодорица, Ю. М. Нефедов. – К.: Вища школа, 1991. – 271 с.
6. Акімов, О. І. Визначення ряду потужностей тягових підстанцій для електрифікованих залізниць [Текст] / О. І. Акімов, Ю. О. Акімова, В. В. Козлова // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2008. – Вип. 99. – С. 237-241.
7. Акімов, О. І. Методичний посібник з курсового та дипломного проектування систем зовнішнього електропостачання електрифікованих залізниць [Текст] / О. І. Акімов. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – 138 с.
8. Акімов, О. І. Електричні мережі електрифікованих залізниць [Текст] / О. І. Акімов, Д. Л. Сушко. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – 278 с.
9. Yuanli, Liu. Optimized Sizing and Scheduling of Hybrid Energy Storage Systems for High-Speed Railway Traction Substations [Text] / Liu Yuanli, Chen Minwu, Lu Shaofeng, Chen Yinyu, Li Qunzhan. // Energies. – 2018. – Vol. 11/2199 – P. 1–29.

Акімов Олександр Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.
Панченко Владислав Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.
E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Заїка Лариса Володимирівна, магістрант зі спеціальності електричні системи та комплекси транспортних засобів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76.

Панютін Олег Миколайович, магістрант зі спеціальності електричні системи та комплекси транспортних засобів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76.

Акімов Олександр Іванович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75.

Панченко Владислав Вадимович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-75. E-mail: vlad_panchenko@ukr.net.

Заїка Лариса Володимирівна, магістрант по спеціальності електричні системи та комплекси транспортних засобів, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-76.

Панютин Олег Николаевич, магистрант по специальности электрические системы и комплексы транспортных средств, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта. Тел.: (057) 730-10-76.

Akimov Olexander, PhD (Tech.), associate professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-75.

Panchenko Vladyslav, PhD (Tech.), associate professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-19-91.

E-mail: vlad_panchenko@ukr.net

Zaika Larysa, master degree in electrical systems and vehicle complexes, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-76.

Paniutin Oleh, master degree in electrical systems and vehicle complexes, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-76.

Статтю прийнято 07.11.2018 р.

УДК 656.212.6:658.5.011.56

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ШТАТНОГО РОЗКЛАДУ В РЕГІОНІ ЗАЛІЗНИЦІ

**Д-р техн. наук І. Е. Мартинов, доц. В. С. Меркулов, старш. викл. І. Г. Бізюк,
канд. техн. наук Р. В. Петрова**

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ШТАТНОГО РАСПИСАНИЯ В РЕГИОНЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

**Д-р техн. наук И. Э. Мартынов, доц. В. С. Меркулов, старш. преп. И. Г. Бизюк,
канд. техн. наук Р. В. Петрова**

AUTOMATION OF PROCESS OF FORMATION OF THE STAFF LIST IN THE REGION OF THE RAILROAD

**D. Sc. (Tech.) I. E. Martynov, associate professor V. Merkulov, senior lecturer I. Biziuk,
PhD (Tech.) R. Petrova**

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156422>

Стаття присвячена питанням організації підсистеми формування штатного розкладу, яка є складовою частиною автоматизованої системи оперативного планування вантажно-вивантажувальних робіт у регіоні дороги та експлуатується у відділі планування перевезень й організації вантажної роботи служби перевезень регіональної філії «Південна залізниця».

Розглянуто функціональний склад підсистеми, структуру бази даних, користувальницький інтерфейс, регламент роботи і засоби захисту інформації.

Визначено перспективи вдосконалення запропонованого програмного продукту, а саме доповнення його засобами моделювання ситуацій, прийняття рішень на основі експертного оцінювання.

Досвід експлуатації системи підтвердив її ефективність.

Ключові слова: *навантаження-вивантаження, автоматизація, база даних, дільниця, станція, ставка, професія, оклад, інтерфейс.*

Статья посвящена вопросам организации подсистемы формирования штатного расписания, которая является составной частью автоматизированной системы оперативного планирования погрузочно-выгрузочных работ в регионе дороги и эксплуатируется в отделе планирования перевозок и организации грузовой работы службы перевозок регионального филиала «Южная железная дорога».

Рассмотрены функциональный состав подсистемы, структура базы данных, пользовательский интерфейс, регламент работы и средства защиты информации.

Отмечены перспективы совершенствования предложенного программного продукта, а именно дополнение его средствами моделирования ситуаций, принятия решений с использованием экспертного оценивания.

Опыт эксплуатации системы подтвердил её эффективность.

Ключевые слова: *погрузка-выгрузка, автоматизация, база данных, участок, станция, ставка, профессия, оклад, интерфейс.*

Automation of process of definition and optimization of numerical and qualitative structure of employees of cargo stations of the railroad is getting a particular importance in modern conditions of development of information technologies.

Article is devoted to questions of the organization of a subsystem of formation of the staff list which is a component of the automated system of operational planning loading – unloading works in the region of the road and is operated in department of planning of transportations and the organization of cargo work of a commercial department of regional branch "Southern railroad". The functional structure of a subsystem, structure of a database, the user interface, the regulations of work and information security measure are considered.

The appeal to a database happens if it is necessary to receive a selection by certain inquiries or to update the available information. Database fragments (sites, stations,...) are characterized by objects (reporting and help documents, telegrams,...), processes (saving of information, editing and formation of sheets,...) and users (staff of department of the organization of work of stations, relevant services of the railroad and cargo stations). The human-machine interface is based on a dialogue combination in the form of "menu" and possibility of the user in the course of work "to move" on the object by means of cursor arrows, a mouse or combinations of function keys.

Discretionary approach to information security is applied, besides, check on an admissibility is carried out and in the course of work copies of operational data are periodically made. Ways of improvement of the described subsystem, namely addition with its simulars of situations, decision-making with use of expert estimation are offered. Operating experience of the offered software product has confirmed its efficiency.

Keywords: *loading unloading, automation, database, site, station, rate, profession, salary, interface.*

Вступ. Вимоги до ефективності управління перевезеннями на залізничному транспорті потребують високого рівня його автоматизації. Інформаційні технології стають не просто засобами підтримки прийняття рішень на різних рівнях управління, але й одним із найважливіших елементів інфраструктури залізниць. З розряду допоміжних засобів вони

переміщуються у клас основних технологій та є визначальною умовою виконання кількісних і якісних показників [5].

Побудувати апарат управління як організаційний механізм прийняття рішень означає необхідність, по-перше, визначити в ньому сферу відповідальності кожного працівника по певному колу організаційних проблем і, по-друге, налагодити їхню

взаємодію на всіх етапах процесу розроблення, прийняття і реалізації рішень. Такий підхід дозволяє врахувати єдність формальних і неформальних аспектів виробничої діяльності та відобразити їхню динаміку.

В оперативних умовах при дефіциті часу на прийняття управляючих рішень актуальною є проблема підвищення їхньої якості. Це невідривно пов'язано із забезпеченістю галузі потрібною кількістю кваліфікованого персоналу, що передбачає наявність сучасної автоматизованої технології кадрового обліку.

Одним з напрямків діяльності відділу планування перевезень й організації вантажної роботи служби перевезень регіональної філії «Південна залізниця» є організація вантажно-вивантажувальних робіт.

За наказом керівництва Південної залізниці на цей відділ було покладено обов'язок ведення штатного розкладу працівників вантажних станцій, обліку персонального складу, внесення необхідних коригувань і формування відповідної звітності на основі внутрішніх організаційно-нормативних документів залізниці та з урахуванням вимог нормативно-правових актів, зокрема Класифікатора професій ДК 003-2010.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На етапі передпроектних досліджень було проведено обстеження предметної області, в тому числі аналіз доступних існуючих аналогів майбутнього програмного продукту.

Так, Р. Е. Мансуров [3] обґрунтовує необхідність формування штатного розкладу, базуючись, у першу чергу, на існуючій на підприємстві технології виробництва. Він пропонує алгоритм визначення технологічно обґрунтованої штатної чисельності персоналу на основі формування схем розміщення персоналу, який виробляє продукцію та обслуговує обладнання, що дає можливість критично оцінити і в кінцевому підсумку сформулювати

технологічно й економічно обґрунтовану штатну чисельність персоналу та його розстановку.

У роботі [2] для системи управління персоналом запропоновано спеціальну організацію даних у пам'яті ЕОМ і зроблено спробу переходу від проблемно-орієнтованої бази даних до інформаційно-орієнтованої. Це дає можливість використання ЕОМ декількома користувачами, які спільно застосовують програми, узагальнюють одержувані результати.

С. В. Скороход [6] пропонує підхід до побудови штатного розкладу на основі функціональної моделі організації. Модель складається із блоків, які позначають функції, кожен блок має вхідну, вихідну, керуючу інформацію і механізми, що реалізують функцію (до яких відносяться штатні одиниці).

Ці системи, хоч і мають багато спільних рис, призначені для різних цілей. Перелік завдань, які вирішуються з їхньою допомогою, досить великий. У кожній з них є свої переваги і недоліки [1].

Аналіз стану проблеми показав, що:

1) придбати готовий програмний продукт дорого, а адаптувати його до потреб замовника працезатратно;

2) як правило, великі автоматизовані системи потребують ретельного вивчення, наявності певного апаратного забезпечення ЕОМ, мають залишковий інтерфейс і передбачають відповідну кваліфікацію користувачів.

Визначення мети та завдання дослідження. Складовою частиною автоматизованої системи оперативного планування вантажно-вивантажувальних робіт у регіоні дороги є підсистема кадрового обліку працівників, задіяних на цій ланці залізниці, основою якої є автоматизоване формування та ведення штатного розкладу (ФШР) [5].

Згідно із ТЗ у ФШР повинні формуватися списки станцій, посад і відповідних посадових окладів, телеграми начальникам станцій, перераховуватися

оклади за новими ставками, вибірки по станціях, дільницях, професіях, кондукторським бригадам, розраховуватися інтегральні дані для довідок, здійснюватися аналіз стану забезпечення дільниці працівниками та ін.

При проектуванні системи були передбачені режими як автономної її експлуатації, так і у складі АСУ «Кадри» та АСК ВП УЗ-Є, які підтримуються виробничим підрозділом «Харківське відділення» філії «Головний інформаційно-обчислювальний центр» публічного акціонерного товариства «Українська залізниця».

Були запропоновані авторами, узгоджені із замовником та в подальшому реалізовані певні заходи щодо підвищення ефективності експлуатаційних характеристик програмного продукту:

1) засоби прискорення роботи системи – фактографічний пошук інформації [8], поданої у вигляді спеціальним чином організованих сукупностей формалізованих записів у базі даних;

2) захист інформації різними способами, в тому числі із використанням дискреційного підходу [9];

3) організація користувальницького інтерфейсу, що сполучає діалог користувача із системою у формі «меню» із можливістю у процесі роботи «рухатися» по об'єкту.

З урахуванням наведених вище міркувань, вихідних параметрів, що цікавлять користувача, та умов експлуатації було прийнято рішення щодо розроблення оригінального програмного продукту.

Основна частина дослідження. При розробленні алгоритму та формуванні бази даних (БД) ФШР враховувалися такі чинники:

1. На вантажних станціях виконуються такі види робіт:

а) вантажні операції – навантаження, вивантаження, перевантаження, а також обслуговування і формування маршруту;

б) комерційні операції – оформлення перевізних документів, приймання,

зважування, зберігання вантажів, огляд вагонів у комерційному відношенні;

в) технічні операції: формування, розформування, прийом, відправлення, пропуск поїздів, огляд вагонів у технічному відношенні.

2. Контингент працівників планують за професіями, розрядами кваліфікації і посадами.

3. Чисельність працівників станції визначають за кількістю об'єктів відповідно до норм робочої сили на об'єкт, за обсягом роботи і встановленими нормами виробітку. Чисельність інженерно-технічних працівників планують за штатним розкладом з урахуванням спеціалізації та організації структури станції.

Склад підсистеми. До складу ФШР входять (див. таблицю):

- функціонально-орієнтовані модулі, що забезпечують виконання певних функцій, – накопичення і зберігання, управління і маніпулювання даними, обробка текстів, підтримка комунікацій;

- проблемно-орієнтовані модулі, які орієнтовані на вирішення завдань, властивих багатьом функціональним користувачам, – протоколювання ресурсів, програмні засоби форматування документів, електронні календарі та ін.

Регламент роботи. В головному меню користувачеві надається можливість вибрати режим роботи із системою залежно від завдання, що вирішується.

У режимі ПЕРЕГЛЯД зі списку вибираються дільниця і станція, здійснюється пошук і перегляд необхідної інформації.

При виборі опції РЕДАГУВАННЯ користувач отримує можливість змінити штатний розклад обраної станції, наприклад, кількість посад, посадових окладів, доплати за шкідливі умови праці і т. п. Передбачена можливість змінити оклади всіх працівників або вибірково по станції чи посаді. Можна додати або видалити конкретну посаду.

Функціональна структура підсистеми ФШР

	<i>Оперативні дані</i>	<i>Довготривалі дані</i>
МОДУЛІ ПОЧАТКОВОГО НАЛАШТУВАННЯ	Формування списку посад. Формування посадових окладів	Формування списку станцій
РОЗРАХУНКОВІ МОДУЛІ	Перерахунок окладів із урахуванням нових ставок. Розрахунок інтегральних даних для довідок	
СЕРВІСНІ МОДУЛІ	Формування вибірок по станціях, дільницях, професіях, кондукторських бригадах. Додавання, редагування та видалення рядків відеограм. Збереження або скасування змін (кількість посад, посадові оклади, доплати за шкідливі умови). Аналіз стану забезпечення дільниці працівниками.	
МОДУЛІ ФОРМУВАННЯ ТА ВИДАЧІ ДОКУМЕНТІВ	Зведена довідка за професіями. Наявність вказаної посади. Наявність посад кондукторських бригад. Зведена відомість за посадами. Телеграми начальникам станцій	

Передбачено режим ДОВІДКА, в якому з наданого переліку довідок користувач вибирає потрібну.

Режим ДРУК пропонує формування за запитом користувача паперового документа, друк довідок, відомостей або телеграм.

Структура бази даних. Звернення користувачів до інформаційної бази даних ФШР відбувається при необхідності отримати або оновити наявну інформацію, яка являє собою результат програмної обробки збережених даних.

Черговий сеанс роботи із системою пов'язаний зі змінами у штатному розкладі та необхідністю одержання, крім зведеної, вибіркової відомостей, що є результатом обробки наявних даних.

Допустима організація даних у базі визначається різноманітністю і кількістю типів об'єктів, що її складають.

Оскільки БД містить відомості про об'єкти предметної області (станції, посади, професії тощо), система відноситься до фактографічних.

Предметна область містить такі фрагменти: регіон дороги, дільниці, станції.

Фрагменти характеризуються об'єктами – звітні та довідкові документи, телеграми; процесами – збереження інформації, формування штатної відомості, редагування штатного розкладу (професій та їхніх посадових окладів і доплат за шкідливі умови); користувачами – співробітниками відділу організації роботи станцій, відповідних служб залізниці і вантажних станцій.

Не зважаючи на те, що вся інформація, яка використовується системою, знаходиться у єдиному сховищі, при реалізації різних процесів одні і ті ж дані можуть бути по-різному подані відповідно до того, яким функціональним модулем вони обробляються. Відмінною рисою такого підходу слід вважати спільне зберігання даних з їхніми описами: наприклад, «посада» (ідентифікатор) зберігається як символічна змінна довжиною 30 символів. Такі незалежні від програм користувачів описи (метадані) становлять самостійний об'єкт зберігання.

Інтеграція даних у системі дозволила синхронно підтримувати їх у всій системі, прискорити процеси переналагодження,

практично уникнути надмірності (скоротити об'єм пам'яті), підвищити рівень достовірності, уніфікувати засоби їхньої організації, а також забезпечити досить високий рівень незалежності програм від організації даних.

Однією з особливостей системи є підтримка різноманітного подання предметної області. При цьому розглядаються як кінцеві користувачі, інтереси яких відображені у зовнішніх схемах (локальні подання) та інфологічній схемі, так і внутрішні – інженер-технолог відділу станцій регіону (концептуальна схема) і розробники, які здійснюють супроводження і модифікацію БД (внутрішня схема).

Організація захисту інформації. У процесі роботи системи (штатне функціонування) кожен день знімаються копії БД, що забезпечує можливість відновлення даних у разі апаратних або програмних збоїв системи.

Захист від некоректних оновлень (логічний і цілісний) забезпечується програмними фільтрами: користувач має доступ лише до частини даних – складових бази (зміни посадових окладів певних станцій).

Крім того, дані перевіряються на допустимість (семантичну цілісність): виключена поява неправильних дат, перевищення регламентного штатного розкладу для конкретної станції за кількістю і номенклатурою працівників і т. п. [7].

Інформаційний обмін між користувачами підсистеми здійснюється за допомогою локальної мережі з архітектурою «клієнт-сервер». Тому було вжито певних заходів щодо захисту файлів, а саме застосовано так званий дискреційний підхід [6], коли кожному зареєстрованому користувачеві відповідає пара цілочисельних ідентифікаторів: ідентифікатор групи, до якої належить користувач, та його власний ідентифікатор. Цими ж ідентифікаторами забезпечується будь-який процес, запущений від імені даного користувача і такий, що має

можливість звертатися до системних викликів файлової системи. Відповідно при кожному файлі зберігається повний ідентифікатор користувача, що створив цей файл (власний ідентифікатор плюс ідентифікатор групи). Крім того, позначається, які дії із файлом може робити він сам, а які – доступні для інших користувачів тієї ж групи, а також що можуть робити користувачі інших груп із файлом. Для кожного файла контролюється можливість читання, запису і виконання. Збережена інформація компактна (два цілих числа для подання ідентифікаторів і шкала з 9 бітів для характеристики можливих дій), при перевірці потрібна мінімальна кількість дій, і цей спосіб контролю доступу цілком задовільний.

Користувальницький інтерфейс. При розробленні користувальницького інтерфейсу були проаналізовані найбільш розповсюджені діалогові системи з точки зору їхньої організації.

Застосування командної мови має свої переваги – простота побудови і реалізації, та недоліки – необхідність запам'ятовування команд та їхніх параметрів, повторення помилкового введення, розмежування доступності команд на різних рівнях та ін. Таким чином, користувач повинен вивчати мову взаємодії.

У ФШР реалізовано користувальницький інтерфейс, який для вибору певних функцій застосовує організацію діалогу у формі «меню» у поєднанні з можливістю користувача в процесі роботи «рухатися» по об'єкту за допомогою клавіш управління курсором або миші та комбінацій функціональних клавіш. За допомогою меню користувач може задіяти різні режими, що становлять «кістяк» програми та ініціюють доступ до усіх об'єктів (у т. ч. управляючих). У рядку заголовка міститься назва документа. Рядок стану відображує поточну інформацію про режим роботи системи та додаткові функціональні елементи. На робочому полі розташовується об'єкт, що обробляється.

Така форма організації діалогу людини і машини є найбільш зручною, всі сучасні програми тією або іншою мірою її використовують.

Висновки. Вплив людського чинника при організації перевізного процесу важко переоцінити. Не можна забувати, що при існуючих технологіях витрати часу і праці на формування штатного розкладу досить істотні, а якість його неповною мірою відповідає поставленим вимогам, що відображується на результатах роботи залізниці в цілому.

Правильно складений штатний розклад узагальнює відомості про чисельність і структуру персоналу організації і витрати на зарплату. З нього можна побачити, скільки штатних одиниць здатні забезпечити нормальну діяльність підприємства і скільки грошей треба на зарплату.

Приблизно те ж саме хочуть побачити із штатного розкладу і перевіряючі: податкова або трудова інспекція, КРУ, прокуратура і т. п. Їм наказано запитувати на перевірях штатний розклад, і вони співставляють інформацію із нього з інформацією про зарплати з трудових договорів, наказів про приймання на роботу, розрахункових листків, свідчень

працівників, зокрема для виявлення «сірих» виплат, перевірки правильності розрахунку страхових внесків або застосування податкових пільг.

Необхідно відзначити, що штатний розклад із внесеними до нього змінами послужить додатковим доказом у разі судового спору з працівником, звільненим за скороченням чисельності або штату.

Запропонована програмна система побудована відкритою для розвитку та модифікацій. Зараз у стадії розроблення перебувають доповнення її можливістю формування текстів наказів із довільного шаблону з використанням ключових слів, формування довідки «Виписка із штатного розкладу» на довільну дату, контролю відповідності наказів з особового складу штатному розкладу, аналізу даних он-лайн, а також засобів моделювання ситуацій прийняття рішень, аналізу поточного стану вантажно-вивантажувальних робіт у регіоні, експертного оцінювання.

Досвід експлуатації запропонованого програмного продукту у відділі планування перевезень й організації вантажної роботи служби перевезень регіональної філії «Південна залізниця» підтвердив його ефективність.

Список використаних джерел

1. Десслер, Г. Управление персоналом [Текст] / Г. Десслер. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 802 с.
2. Кибанов, А. Я. Управление персоналом организации [Текст]: учебник / А. Я. Кибанов. – М.: ИНФРА-М, 2010. – 695 с.
3. Мансуров, Р. Е. Опыт формирования экономически и технологически обоснованного штатного расписания промышленного предприятия [Текст] / Р. Е. Мансуров // Управление персоналом. – 2008. – № 1. – С. 49-50.
4. Меркулов, В. С. Організація доступу та захист даних при формуванні технічних норм вантажних робіт у відділенні залізниці [Текст] / В. С. Меркулов, І. Г. Бізюк // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 160. – С. 22-23.
5. Самсонкин, В. Н. Концепция построения автоматизированной системы оперативного планирования погрузочно-выгрузочных работ и ведения штатного расписания в регионе дороги [Текст] / В. Н. Самсонкин, В. С. Меркулов. – К.: Залізничний транспорт України, 2008. – № 3. – С. 6-10.

6. Скороход, С. В. К вопросу о построении информационной модели штатного расписания [Текст] / С. В. Скороход // Известия Южного федерального университета. – 2007. – Т. 77. – Вып. 2. – С. 212-214.

7. Управление и информационные технологии на железнодорожном транспорте [Текст] : учебник для вузов ж.-д. транспорта / Л. П. Тулупов, Э. К. Лецкий, И. Н. Шапкин, А. И. Самохвалов. – М. : Маршрут, 2005. – 467 с.

8. Tornquist, J. Railway traffic disturbance management—An experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon [Text] / J. Tornquist // Transportation Research Part A: Policy and Practice: – Volume 41, Issue 3, March 2007. – P. 249-266.

9. Giannetti, C. Risk based uncertainty quantification to improve robustness of manufacturing operations [Text] / C.Giannetti, R.Ransing // Computers&Industrial Engineering: – Vol.101. – 2016. – P.70-80.

Мартинов Ігор Ернстович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри вагонів Українського державного університету залізничного транспорту. Тел: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Меркулов Віктор Сергійович, доцент кафедри обчислювальної техніки та систем управління Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-40. E-mail: merkulov@kart.edu.ua.

Бізюк Ірина Григорівна, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та систем управління Українського державного університету залізничного транспорту. Тел: (057) 730-10-40. E-mail: biziuk@kart.edu.ua.

Петрова Роксана Вадимівна, канд. техн. наук, доцент кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою Харківського національного університету радіоелектроніки. Тел: (067) 775-13-57. E-mail: petrova@nure.ua.

Мартынов Игорь Эрнстович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой вагонов Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел: (057)730-10-36.

E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Меркулов Виктор Сергеевич, доцент кафедры вычислительной техники и систем управления Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел: (057) 730-10-40.

E-mail: merkulov@kart.edu.ua.

Бизюк Ирина Григорьевна, старший преподаватель кафедры вычислительной техники и систем управления Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел: (057) 730-10-40.

E-mail: biziuk@kart.edu.ua.

Петрова Роксана Вадимовна, канд. техн. наук, доцент кафедры экономической кибернетики и управления экономической безопасностью Харьковского национального университета радиоэлектроники.

Тел: (067) 775-13-57. E-mail: petrova@nure.ua.

Martynov Igor Ernstovych, D. Sc. (Tech.), professor, Head of Department of Vagons, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-36. E-mail: martinov.hiit@gmail.com.

Merkulov Viktor Sergeevich, associate professor, Department of Computer and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-40. E-mail: merkulov@kart.edu.ua.

Biziuk Iryna Grygoriyevna, senior lecturer, Department of Computer and Control Systems, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-40. E-mail: biziuk@kart.edu.ua.

Petrova Roksana Vadimovna, PhD (Tech.), associate professor, Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security, Kharkiv National University of Radioelectronics. Tel.: (067) 775-13-57.

E-mail: petrova@nure.ua.

Статтю прийнято 27.11.2018 р.

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 624.012.35:620.173/174

**РОЗРАХУНОК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З
УРАХУВАННЯМ РІВНІВ УТВОРЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН**

Д-р техн. наук В. М. Ромашко, старш. викл. О. В. Ромашко

**РАСЧЕТ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ
УРОВНЕЙ ОБРАЗОВАНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ТРЕЩИН**

Д-р техн. наук В. Н. Ромашко, старш. преп. Е. В. Ромашко

**CALCULATION OF THE CRACK RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE
ELEMENTS WITH ALLOWANCE FOR THE LEVELS OF NORMAL CRACKS
FORMATION**

D. Sc. (Tech.) V. Romashko, senior lecturer O. Romashko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156429>

Проаналізовано найважливіші недоліки існуючих методів розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням багаторівневого утворення тріщин. На основі деформаційно-силової моделі опору бетону та залізобетону запропоновано інженерний метод розрахунку утворення та розкриття дискретних тріщин на експлуатаційних стадіях. Його простота обумовлена використанням нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном на ділянках залізобетонного елемента між суміжними тріщинами.

Ключові слова: залізобетонні елементи, тріщиностійкість, рівні утворення тріщин, середні напруження зчеплення.

Проанализированы важнейшие недостатки существующих методов расчета трещиностойкости железобетонных элементов с учетом многоуровневого образования трещин. На основе деформационно-силовой модели сопротивления бетона и железобетона разработан инженерный метод расчета образования и раскрытия дискретных трещин на эксплуатационных стадиях. Его простота обусловлена использованием нелинейной функции средних напряжений сцепления арматуры с бетоном на участках железобетонного элемента между смежными трещинами.

Ключевые слова: железобетонные элементы, трещиностойкость, уровни образования трещин, средние напряжения сцепления.

The importance of the step formation of cracks in reinforced concrete elements for the modern theory of concrete and reinforced concrete is substantiated. The separate experimental investigations results and the major drawbacks of existing methods of calculating the reinforced concrete elements crack resistance are considered in detail, taking into account the process of multilevel formation and crack opening. Based on the basic provisions of the deformation and strength model of concrete and reinforced concrete resistance, an engineering method for

calculating the formation and disclosure of discrete cracks in the reinforced concrete elements and structures normal sections at the operational stages of their deformation is proposed. It is based on the determination of the active coupling of reinforcing concrete with expanded concrete, due to the known function of the average stresses of this bond. Dependences are obtained on the determination of the distances between adjacent cracks as one and different levels of their formation. The formula for determining the width of opening of normal cracks from the positions of successive accumulation of mutual displacements of reinforcement and concrete with their degree of formation is proposed. The developed method for calculating the degree of formation and disclosure of normal cracks in reinforced concrete elements develops and complements the generalized strain-force model of the resistance of concrete and reinforced concrete. It is implemented on the system of generally accepted static, geometric and physical relations of a deformed solid mechanics. The proposed calculation method simplicity is due to the use of the nonlinear function of the average stresses of the reinforcement bond with concrete on the sections of the reinforced concrete element between adjacent cracks. The main advantages of the developed calculation method in comparison with others are outlined.

Keywords: reinforced concrete elements, crack resistance, crack formation levels, average adhesion stresses.

Вступ. Загалом питання тріщиностійкості залізобетонних елементів у теорії бетону та залізобетону завжди були та залишаються й понині одними з визначальних. І пов'язано це в першу чергу з необхідністю оцінки дійсного напружено-деформованого стану зазначених елементів в експлуатаційних стадіях. Але описати цей стан навіть наближено вкрай складно, оскільки довжина окремих блоків, на які послідовно ділиться залізобетонний елемент у процесі утворення тріщин, є змінною та залежить від дуже багатьох факторів.

Оскільки процес утворення та розкриття тріщин у залізобетоні веде до порушення його суцільності, то оцінку напружено-деформованого стану залізобетонних елементів намагаються пов'язувати з основними положеннями механіки руйнування. При цьому мало хто звертає увагу на те, що задача розрахунку відстаней між тріщинами в принципі не може мати точного аналітичного розв'язання через початкові усадкові мікророзриви суцільності бетону на поверхні його розтягнутої зони. Тому інженерні методи розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів, що базуватимуться на загальних

закономірностях зміни відстаней між тріщинами та деформацій арматури і опору бетону зсуву на ділянках між тріщинами, залишатимуться актуальними і надалі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Доволі детальна класифікація та ретельний аналіз численних досліджень тріщиностійкості залізобетонних елементів наведені в роботі [1]. При цьому варто вказати, що переважна більшість методів розрахунку за результатами згаданих досліджень розроблювалася для стадії стабілізованого тріщиноутворення залізобетонних елементів. Що ж до наявних методик розрахунку тріщиностійкості елементів з урахуванням багаторівневого утворення тріщин, то, не дивлячись на певне накопичення результатів експериментальних досліджень [2–8], вони є дуже обмеженими та знаходяться лише на стадії формування. За своєю спрямованістю ці методики можна класифікувати як такі, що ґрунтуються:

- на моделі «двоконсольного» елемента в перерізі з тріщиною [4];
- рішеннях строго в рамках механіки крихкого руйнування [8];
- моделях опору розтягнутого бетону зсуву арматури на ділянках між суміжними тріщинами [6, 9, 10].

Загалом «двоконсольний» елемент у перерізі з тріщиною використовують для переведення доволі складних залежностей механіки руйнування в менш складні залежності механіки деформованого твердого тіла [4]. Але основний недолік цього методу полягає в тому, що правильне виділення зазначеного «двоконсольного» елемента є доволі складною задачею, яка у свою чергу повинна бути ретельно ув'язана не тільки з напружено-деформованим станом поперечного перерізу залізобетонного елемента, але й закономірностями зчеплення арматури з бетоном.

Рішення, запропоновані строго в рамках механіки руйнування [8], є настільки складними, що сьогодні можуть бути реалізовані тільки програмно, зокрема за допомогою методу скінчених елементів. При цьому доволі часто втрачається або нівелюється фізична сутність процесу дійсного деформування залізобетонних елементів.

Щодо методик розрахунку, які базуються на моделях опору розтягнутого бетону зсуву арматури на ділянках між суміжними тріщинами, то їх можна розділити на три групи.

У методиках першої групи опір бетону зсуву арматури розглядається з позицій пружно-пластичного матеріалу зі зміцненням [6] і ґрунтується на використанні цілої низки істотних спрощень та емпіричних параметрів і коефіцієнтів. Через це зазначені методики дуже наближено відображують процеси тріщиностійкості залізобетонних елементів у реальних умовах свого деформування.

Методики другої групи передбачають ступінчасте числове інтегрування диференціального рівняння переміщення композита відносно арматурного стрижня [9] з використанням низки емпіричних параметрів і коефіцієнтів. Обумовлено це неможливістю прямого інтегрування сплайн-функції взаємного зміщення бетону і арматури на всьому діапазоні деформування залізобетонного елемента через її кускову апроксимацію.

Одними з найпростіших є методи третьої групи, за якими опір бетону зсуву арматури визначають за середніми напруженнями зчеплення арматури з бетоном на ділянці між суміжними тріщинами [10]. Однак виникає ціла низка застережень щодо їхньої методологічної обґрунтованості в питаннях:

- визначення дійсної кривини та жорсткості залізобетонного елемента в перерізах з тріщинами;
- оцінки стану елемента за станом матеріалів в окремих перерізах, з одного боку, і середніми напруженнями зчеплення арматури з бетоном на ділянці між суміжними тріщинами, з іншого боку;
- лінійності функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном на всьому діапазоні деформування залізобетонного елемента.

І, мабуть, найголовніше, що варто відзначити: жодна з вищезгаданих методик не може бути реалізована в інженерному безпрограмному варіанті. Універсальна методика розрахунку тріщиностійкості залізобетонних елементів, у тому числі з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин, повинна з однаковим успіхом реалізовуватися як в інженерному, так і програмному виконанні.

Визначення мети та завдань дослідження. Дані дослідження спрямовані на розроблення інженерного методу розрахунку утворення та розкриття дискретних тріщин на будь-яких стадіях деформування залізобетонних елементів. Для досягнення мети порушуються два основних завдання:

- максимальне забезпечення універсальності методу за допомогою основних положень деформаційно-силової моделі опору залізобетону [1, 11];
- забезпечення максимальної простоти методу завдяки використанню нелінійної функції середніх напружень зчеплення арматури з бетоном на ділянках залізобетонного елемента між суміжними тріщинами.

Основна частина дослідження. За деформаційно-силовою моделлю [1] виникнення нормальних тріщин першого рівня в залізобетонному елементі розраховують згідно з двома загальноприйнятими рівняннями рівноваги при граничних деформаціях розтягнутого бетону ε_{ctu} , що фіксуються за екстремальним критерієм його міцності $dN_{ct}/d\varepsilon_{ct} = 0$ або приймаються рівними $\varepsilon_{ctu} = 2f_{ctk}/E_{co}$. При цьому відстань між тріщинами обчислюють з умови рівноваги

максимальних зусиль у розтягнутому бетоні $N_{ct,cr} = f(\varepsilon_{ctu})$ і зусиль активного зчеплення на ділянці між тріщинами $N_{bd,cr}$.

Зусилля активного зчеплення арматури з розтягнутим бетоном за відомої функції середніх напружень цього зчеплення τ_{bmi} можна визначати при утворенні тріщин відповідного рівня за формулою

$$N_{bd,cr} = \int_{s_r} u \cdot \tau_b(z) \cdot dz \cong u \cdot \tau_{bmi} \cdot s_{ri}, \quad (1)$$

де u – периметр перерізу арматурного стержня діаметром \varnothing_s , що має площу A_s , рівний $u = 4 \cdot A_s / \varnothing_s$;

s_{ri} – ділянка активного зчеплення арматурного стрижня з бетоном (відстань) між тріщинами відповідного рівня;

τ_{bmi} – значення середніх напружень зчеплення арматури з бетоном на ділянці між тріщинами відповідного рівня.

За результатами обробки численних експериментальних даних [12–14] їх пропонується обчислювати за таким степеневим виразом:

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / \sigma_y)^{1-1/\eta_s}, \quad (2)$$

де η_1 – коефіцієнт, що враховує профіль арматурного стрижня [1] за критерієм Рема;

η_2 – коефіцієнт, що враховує вплив діаметра арматури [15];

f_{ctk} – характеристичне значення міцності бетону на розтяг;

σ_{si} – напруження в арматурі в перерізі з тріщиною відповідного рівня;

σ_y – граничні напруження в арматурі ($\sigma_y = f_y$);

$1/\eta_s$ – параметр інтенсивності зчеплення (для арматури періодичного профілю $\eta_s = \eta_1$, для арматури гладкого профілю $\eta_s = 6 \cdot \eta_1$).

Отже, з урахуванням всіх вищенаведених положень, відстань між суміжними тріщинами першого рівня на рівні центра ваги розтягнутої арматури при напруженнях у ній $\sigma_{si} = \varepsilon_{ctu} \cdot E_s$ можна визначати за такою залежністю:

$$s_{r1} = \frac{\varnothing_s}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\varepsilon_{ctu} \cdot E_s / \sigma_y)^{1-1/\eta_s}} \cdot \frac{N_{ct,cr}}{A_s}. \quad (3)$$

Оскільки середні напруження зчеплення на ділянках між тріщинами є різними через прямий зв'язок з величиною нормальних напружень в арматурі, то в

згинальних елементах відстані між нормальними тріщинами нових і попередніх рівнів (рисунок) завжди різнитимуться між собою. Їх можна знаходити за виразами

$$S_{ri+1,j} = \frac{S_{ri,j} \cdot \tau_{bmi+1,j+1}}{\tau_{bmi+1,j} + \tau_{bmi+1,j+1}}; S_{ri+1,j+1} = \frac{S_{ri,j} \cdot \tau_{bmi+1,j}}{\tau_{bmi+1,j} + \tau_{bmi+1,j+1}}, \quad (4)$$

де j – номер нормальної тріщини (як правило, першої за порядком $j = 1$) відповідного рівня їхнього утворення – i .

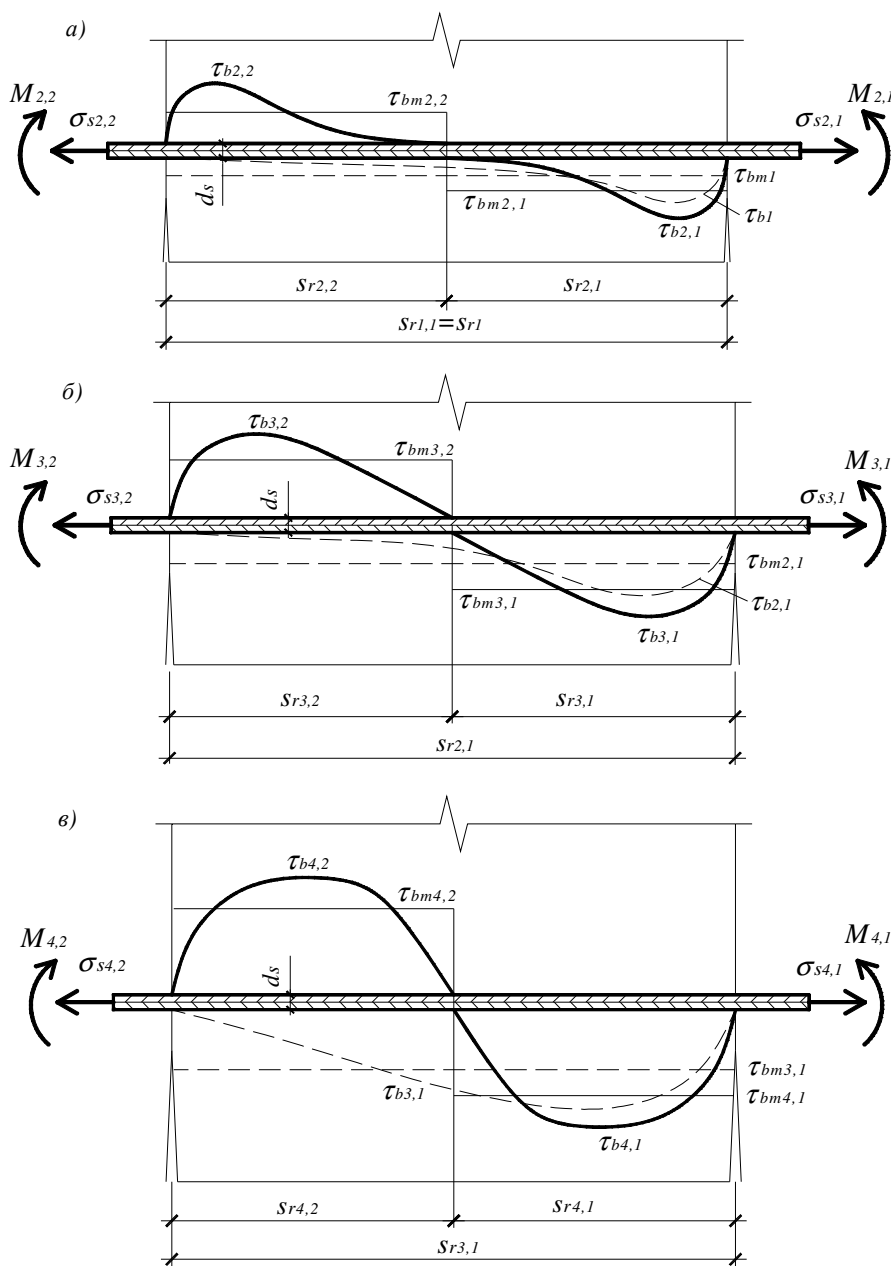


Рис. Схема зміни дотичних напружень зчеплення арматури з бетоном після утворення тріщин першого (а), другого (б) і третього (в) рівнів

Якщо ж знехтувати різницею напружень в арматурі в перерізах з суміжними тріщинами, то подальші розрахунки, у тому числі і ширини розкриття тріщин, можна суттєво спростити, прийнявши $s_{ri+1} = s_{ri} / 2$.

Розрахунок розкриття нормальних тріщин доцільно виконувати, за гіпотезою Томаса, з позицій послідовного накопичення взаємних зміщень арматури і бетону

$$w_k = s_{r1} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_{sm,i} - \varepsilon_{ctm} \right) - s_{ri,j} \cdot \left(\sum_{i=2}^n \varepsilon_{sm,i} - \varepsilon_{ctm} \right) - \dots - s_{ri,j} \cdot \left(\sum_{i=n}^n \varepsilon_{sm,i} - \varepsilon_{ctm} \right), \quad (5)$$

де $\varepsilon_{sm,i}$ – середні значення відносних деформацій розтягнутої арматури на ділянці між тріщинами певного рівня;

ε_{ctm} – середні значення відносних деформацій розтягнутого бетону на тій самій ділянці.

Загалом середні деформації арматури на ділянці між тріщинами певного рівня слід визначати безпосередньо з діаграми стану елемента (за його кривиною) в осередненому перерізі блока між тріщинами $\varepsilon_{sm,i} = f(1/r)$. Що ж до середніх деформацій розтягнутого бетону на відповідній ділянці, то їх рекомендується обчислювати за формулою

$$\varepsilon_{ctm} = 0,5 \cdot \varepsilon_{ctu} \cdot (d - x) / (h_n - x), \quad (6)$$

де d – робоча висота поперечного перерізу залізобетонного елемента;

h_n – повна висота поперечного перерізу того самого залізобетонного елемента.

Оскільки в деформаційно-силовій моделі [1] величина середніх деформацій арматури на ділянках між тріщинами

$w_k = 2 \int_{\hat{i}}^{0,5s_r} \varepsilon_{\tau}(z) dz$ на ділянках активного зчеплення, розміщених з обох боків від тріщини. А оскільки в залізобетонному елементі залежність взаємних зміщень арматури і розтягнутого бетону $\varepsilon_{\tau}(z) = \varepsilon_s(z) - \varepsilon_{ct}(z)$ є доволі складною та не може бути описана єдиною функцією, то ширину розкриття нормальних тріщин з урахуванням вищевикладеного пропонується обчислювати за такою формулою:

контролюється за діаграмами стану залізобетонних елементів протягом всього процесу їх деформування, то це дозволяє зв'язати ширину розкриття нормальних тріщин з визначальними параметрами напружено-деформованого стану зазначених елементів замкненою системою загальноприйнятих статичних, геометричних і фізичних співвідношень або рівнянь механіки деформованого твердого тіла.

Висновки. Отже, зважаючи на результати, слід зазначити, що розроблена модель ступеневого утворення та розкриття нормальних тріщин:

- доповнює узагальнену модель деформування залізобетонних елементів;
- є універсальною, бо у своїй основі максимально позбавлена впливу емпіризму та прийнятна для будь-яких залізобетонних елементів, що зазнають неоднорідного деформування;
- враховує якісну та кількісну різницю між параметрами зчеплення арматури з бетоном і розглядає відстань між суміжними тріщинами як величину, що дискретно змінюється протягом усього процесу деформування;
- відображує залежність середніх дотичних напружень зчеплення арматури з

розтягнутим бетоном від низки факторів, включаючи вид і профіль арматури;

- безпосередньо пов'язує тріщиностійкість залізобетонних елементів з основними параметрами їх напружено-деформованого стану (значеннями кривини $1/r_i$, величинами згинальних моментів M_i , напруженнями в арматурі $\sigma_{s,i}$, її

деформаціями $\epsilon_{s,i}$ тощо);

- дозволяє контролювати процес утворення та розкриття нормальних тріщин у залізобетонних елементах на будь-якій стадії їх деформування з позицій послідовного накопичення взаємних зміщень арматури відносно бетону.

Список використаних джерел

1. Ромашко, В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону [Текст] : монографія / В. М. Ромашко. – Рівне : О. Зень, 2016. – 424 с.
2. Молодченко, Г. А. Исследование процесса трещинообразования в железобетоне при растяжении [Текст] / Г. А. Молодченко // Строительные конструкции. – К. : Будівельник, 1972. – Вып. XIX. – С. 80-84.
3. Хакимов, Ш. А. Особенности трещинообразования в балках с различной толщиной защитного слоя бетона [Текст] / Ш. А. Хакимов // Воздействие статических, динамических и многократно повторяющихся нагрузок на бетон и элементы железобетонных конструкций; [под ред. А.А. Гвоздева]. – М. : Стройиздат, 1972. – С. 65-86.
4. Бондаренко, В. М. Расчётные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – М. : Издательство «АСВ», 2004. – 472 с.
5. Peña, C. B. Serviceability behaviour of fibre reinforced polymer reinforced concrete beams: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy by the University of Girona [Text] / Cristina Barris Peña. – Universitat de Girona, 2010. – 336 p.
6. Майоров, В. И. От условной к точной модели расчета трещиностойкости железобетонных сечений [Текст] / В. И. Майоров, П. К. Кузьмин // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 2. – С. 22-28.
7. Баширов, Х. З. Железобетонные составные конструкции транспортных зданий и сооружений [Текст] : автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Х. З. Баширов. – М., 2013. – 48 с.
8. Shardakov, I. N. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment) [Text] / I. N. Shardakov, and etc. // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2016. – vol. 3. – P. 339-350.
9. Alvarez, M. Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton: Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Technischen Wissenschaften [Text] / Manuel Alvarez. – Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1998. – 189 p.
10. Кочкаръов, Д. В. Визначення ширини розкриття тріщин у центрально-розтягнутих залізобетонних елементах за багаторівневого процесу утворення тріщин [Текст] / Д. В. Кочкаръов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2014. – Вип. 28. – С. 228-236.
11. Romashko, V. The construction peculiarities of the deformation and power model of concrete and reinforced concrete resistance [Text] / V. Romashko, O. Romashko // MATEC Web of Conf. 116, 02028, 1-8 (2017).
12. Гараи, Т. Исследование анкеровки арматуры в бетоне [Текст] / Т. Гараи // Исследование прочности элементов железобетонных конструкций: сб. тр. НИИЖБ. – М. : Госстройиздат, 1959. – Вып. 5. – С. 78-109.

13. Adrouche, K. Influence of the constitutive parameters for steel-concrete association on bond strength under slow cyclic loading [Text] / K. Adrouche, M. Lorrain // Materials and Structures, RILEM. – 1987. – vol. 20. – P. 315-320.

14. Rashedul, K. Bond stress behavior between concrete and steel rebar: Critical investigation of pull-out test via Finite Element Modeling [Text] / K. Rashedul, I. Mashfiqul // International Journal of Civil and Structural Engineering. – 2014. – Vol. 5 (1). – P. 80-90.

15. Eurocode-2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Building: EN 1992-1-1 [Final Draft, December, 2004], Brussels: CEN, 2004. – 226 p.

Ромашко Василь Миколайович, д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Ромашко Олена Васильвна, старший викладач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василий Николаевич, д-р техн. наук, доцент, заведуючий кафедрой основ архитектурного проектирования, конструирования и графики Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно). Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Ромашко Елена Васильевна, старший преподаватель кафедры основ архитектурного проектирования, конструирования и графики Национального университета водного хозяйства и природопользования (г. Ровно). Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasyl, D. Sc. (Tech.), associate professor, Head of Department Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Romashko Olena, senior lecturer, Department of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne). Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Статтю прийнято 25.10.2018 р.

УДК 666: 519.8

СТІЙКІСТЬ БЕТОНІВ ПРИ ПЕРІОДИЧНИХ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВАХ

Канд. техн. наук О. О. Коробко, доктори техн. наук В. М. Вировой, В. Г. Суханов, канд. техн. наук Ю. О. Загорчємний (ОДАБА)

СТОЙКОСТЬ БЕТОНОВ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Канд. техн. наук О. А. Коробко, доктора техн. наук В. Н. Вировой, В. Г. Суханов, канд. техн. наук Ю. О. Загорчємный (ОГАСА)

RESISTANCE OF CONCRETES AT PERIODIC EXTERNAL INFLUENCES

PhD (Tech.) O. Korobko, D. Sc. (Tech.) V. Vyrovoy, D. Sc. (Tech.) V. Sukhanov, PhD (Tech.) Yu. Zakorchemny

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156456>

Стійкість бетонів при малоцикловій утомі визначається сітками тріщин і внутрішніх поверхонь розділу як активних елементів структури. Зміна пошкодженості матеріалу свідчить про адаптацію структури до дії зовнішніх впливів. Направлено організовувати структуру бетонів можна за рахунок збільшення структурного різноманіття шляхом зміни співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною матрицею та поверхнею заповнювачів.

Ключові слова: бетон, структура, тріщини, внутрішні поверхні розділу, пошкодженість, стійкість, малоциклова втома.

Стойкость бетонов при малоцикловой усталости определяется сетями трещин и внутренними поверхностями раздела как активных элементов структуры. Изменение поврежденности материала свидетельствует об адаптации структуры к внешним воздействиям. Направленно организовывать структуру бетонов можно за счет увеличения структурного разнообразия путем изменения соотношения адгезионно-когезионных сил связи на границе раздела между цементной матрицей и поверхностью заполнителей.

Ключевые слова: бетон, структура, трещины, внутренние поверхности раздела, поврежденность, стойкость, малоцикловая усталость.

The purpose of the work is to increase resistance of concrete in conditions of repeated freezing-thawing and wetting-drying. An important property of concrete is its ability to adapt to the periodical effect of external factors by self-organization of the structure. It assumes the presence at the material of active elements capable of changing their parameters adequately to impacts. Such elements are cracks and inner surfaces of partition as integral elements of the structure of any material. The manifestation of adaptation effects connected with self-development of cracks can be realized as the transformation of cracks into inner surfaces of partition. It stops the growth of cracks, increases the discreteness of composites and creates preconditions for the localization of deformations and stresses in individual blocks of material. It contributes to the dissipation of excess energy on the banks of various cracks and inner surfaces of partition. The ability of cracks to redistribute deformations between blocks prevents their local accumulation that reduces the general stress-strain state of the material. Sets of active elements can be to receive by directing the structural organization of concrete. Poly-structure of concretes implies mutual influence and interaction of the structural levels at all periods of their life cycle. The operating factor of structure formation can be a change in the ratio of adhesion and cohesive bonding forces at the surface of partition between the matrix material and the fillers. In the local volumes of macrostructure of concrete, a variety of sets of active elements are formed, which at the level of the material structure integrative determine its functional potential and the conditions of interaction with the environment. Concrete whose structure was initiated by selective adhesion of a matrix to the surface of fillers differed in the raised values of properties. Sets of active elements are the factors of safe functioning of building constructions.

Keywords: concrete, structure, cracks, inner surfaces of partition, damage, resistance, low cycle fatigue.

Вступ. Останнім часом у сучасному матеріалознавстві набуває розвитку наукова концепція, яка базується на домінуючій ролі структури в реалізації поведінки матеріалу. Бетон, як матеріал будівельних виробів, при експлуатації зазнає багаторазових температурних і вологісних впливів і вимушено реагує на них спонтанною організацією структури [1, 2]. Це передбачає співіснування в матеріалі наборів структурних елементів, які практично миттєво здатні змінювати власні

параметри під дією зовнішніх і внутрішніх факторів. Такими елементами є технологічні та експлуатаційні тріщини і внутрішні поверхні розділу (ВПР), які присутні на всіх рівнях неоднорідностей поліструктурної будови бетонів [3, 4]. Тому аналізувати структурні зміни бетону при малоцикловій утомі доцільно через подання структури у вигляді сітки активних елементів, організованої як «сітки всередині сіток». Кожна сітка являє собою певний набір тріщин і внутрішніх

поверхонь розділу на конкретному структурному рівні. Направлено одержувати набори активних елементів можна за рахунок регулювання організацією структури бетону на рівні макроструктури зміни співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матричним матеріалом і заповнювачами. Залежно від початкового розподілу тріщин і ВПР буде визначатися зміна пошкодженості бетону як прояв ефектів адаптації, що забезпечують підтримку заданого рівня механічних і деформативних властивостей матеріалу в складних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будівельні композити, включаючи бетони, можна представити як системні цілісності, що являють собою ієрархію взаємозалежних різномасштабних структур (підсистем) [3, 5]. Всі підструктури здатні вступати у взаємодію, реагувати на вплив зовнішніх факторів і викликати взаємні структурні зміни, ініціюючи прояв деформацій [1, 6, 7]. Крім того, широкий спектр окремих взаємозв'язаних підструктур дає проявитися багатоманітним ефектам адаптації при дії навколишнього середовища. Тому аналізувати умови структурної самоорганізації та формування властивостей будівельних композитів доцільно в рамках структурного підходу на основі їх моделі як багатофункціональних систем [5, 8]. При цьому необхідно враховувати структурну нероздільність і взаємозв'язаний прояв властивостей будівельного виробу і матеріалу, з якого він виготовлений, і функції тріщин у структуроутворенні та руйнуванні конструкцій як складно організованих систем [9]. На підставі цього можна оцінити вплив окремих підструктур на умови безпеки функціонування виробу.

Визначення мети та завдань дослідження. Подання будівельних виробів як системи, що самоорганізується та є відкритою до зовнішніх факторів [1, 2], дає змогу виявити фактори взаємообумовле-

ного формування різнорівневих підструктур бетону для одержання заданого набору структурних елементів, які визначають збереження проектного рівня властивостей виробу в різних умовах експлуатації. Отже, мета дослідження – підвищення стійкості бетонів на щільних і пористих заповнювачах при малоцикловій утомі, пов'язаній з періодичними циклами зволоження-висушування і заморожування-відтавання, завдяки забезпеченню структурного різноманіття на макрорівні.

Для досягнення сформульованої мети потрібно вирішити такі завдання:

– проаналізувати прояв реакцій матеріалу як сітки тріщин і внутрішніх поверхонь розділу на дію навколишнього середовища;

– визначити коефіцієнти стійкості бетону та керамзитобетону при періодичних зовнішніх впливах.

Основна частина досліджень.

Досліди проводили на зразках-кубах розміром $100 \times 100 \times 100$ мм, які були виготовлені з бетону та керамзитобетону. Наряду з традиційними складами використовували бетони на заповнювачах з різним станом поверхні. Частину щебеня чи гравію (у кількості 50 % за масою загальної кількості заповнювачів у бетонній суміші) піддавали гідрофобізації речовиною ГКР-11 марки А вітчизняного виробництва шляхом повного занурення зерен на 5-10 хвилин у розчин гідрофобізатора концентрацією 2 % за масою з подальшим їх висушуванням при $T \leq 100^\circ\text{C}$. Це забезпечило різноманітні співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між цементною матрицею і заповнювачами в бетоні одного складу: $R_A > R_K$, $R_A < R_K$, $R_A = R_K$, де R_A – величина адгезії матриці до поверхні заповнювачів, R_K – величина когезійної міцності матричного матеріалу.

Залежно від умов взаємодії цементної матриці з заповнювачами було виконано коректування складів бетону за значеннями В/Ц. При постійній рухливості бетонної суміші одержано звичайний бетон класів:

C30/35 при $R_A > R_K$, C25/30 при $R_A < R_K$, C32/40 при $R_A = R_K$ та керамзитобетон класу LC 12/13 при $R_A > R_K$ і класу LC 16/18 при $R_A < R_K$ та $R_A = R_K$ з відповідними показниками властивостей.

Пошкодженість матричного матеріалу оцінювали через коефіцієнт пошкодженості K_p :

– як відношення $K_p = \sum L_i / S$, $\text{см}/\text{см}^2$, де $\sum L_i$ – сумарна протяжність технологічних тріщин і внутрішніх поверхонь розділу на виділеній поверхні зразка, см ; S – фіксована площа поверхні зразка, см^2 ;

– як відношення $K_{p1} = \sum L_i / L_i$, де $\sum L_i$ – сумарна протяжність берегів окремих тріщин і внутрішніх поверхонь розділу (фактична довжина тріщини руйнування), см , вздовж геодезичної лінії L_i , см (найкоротша відстань між точками виходу фактичної тріщини руйнування на торцеві поверхні зразка).

Виміри проводили по 5 сторонах, крім верхньої, кожного зразка, вираховуючи K_p як середнє арифметичне одержаних значень.

Сумарна кількість тріщин і ВПР визначає гетерогенність матеріалу та його пошкодженість початковими активними елементами. У роботі [3] пропонується розглядати «пошкодженість» як характеристику структури, що відображує розподіл тріщин і внутрішніх поверхонь розділу в об'ємі матеріалу.

Показники міцності при стиску ($f_{ck.cube}$, МПа), модуля пружності (E , МПа $\cdot 10^3$), відкритої пористості (P_o , %), середньої густини (ρ_w , $\text{кг}/\text{м}^3$), водопоглинання (W , %) і маси (m , г) бетонних зразків до та після кожного циклу періодичних температурних і вологісних впливів визначали за стандартними методиками. На основі одержаних значень різних властивостей були вираховані коефіцієнти стійкості бетону і керамзитобетону при поперемінному заморожуванні-відтаванні та зволоженні-висушуванні. Коефіцієнти стійкості

визначали як відношення $K_{ct} = Q^{N_{ц}} / Q^{28}$, де $Q^{N_{ц}}$ – показник властивості бетонів після певної кількості циклів впливу, Q^{28} – показник властивості бетонів після 28 діб нормального тверднення.

Під структурним різноманіттям слід розуміти співіснування взаємозалежно-підпорядкованих підструктур бетону, організованих за якісно відмінними механізмами структуроутворення [3, 4]. Різномасштабність підструктур, які складаються з наборів характерних лише для них структурних елементів, передбачає їхню здатність до взаємовпливу при формуванні інтегральної структури матеріалу та виконанні виробом закладених у нього функцій. Тому структурне різноманіття є важливим фактором безпеки функціонування будівельного виробу і стійкості матеріалу, який визначається переважно проявом взаємодій різноманітних підструктур і їхніми взаємозв'язками. Це сприяє переорганізації структури бетону в одному темпоритмі зі зміною зовнішніх умов [3].

Аналіз експериментальних результатів показав, що поліпшеними показниками відрізнялися бетони, структура яких буда ініційована вибірковою адгезією матриці до поверхні заповнювачів ($R_A = R_K$). Зміна співвідношень сил зв'язку на границях розділу між матричним матеріалом і заповнювачами позначається на параметрах структури бетону та керамзитобетону, що було підтверджено зміною показників середньої густини, пористості та початкової пошкодженості композиційних матеріалів. Значення K_p бетонів прийнятих складів відрізнялися в середньому на 25 %. При вибірковій адгезії матеріалу до заповнювачів пошкодженість цементної матриці зросла до 29 % в бетонах на гранітовому щебені та зменшилась до 39 % в бетонах на керамзитовому гравії порівняно з бетонами традиційних складів. При організації структури в умовах $R_A = R_K$ важкий бетон і керамзитобетон відзначалися меншою величиною

капілярної пористості та підвищеними показниками міцності і модуля пружності в середньому на 20 % і 15 % відповідно при зменшенні показників водопоглинання до 14-24 % і глибини карбонізації до 6 мм.

Деформації різних видів проявляються на всіх етапах «життєвого» циклу структури матеріалу будівельних виробів. Це дозволяє віднести деформації до ключових факторів з визначення умов взаємообумовленої реалізації процесів структуроутворення складної ієрархії рівнів неоднорідностей і формування властивостей виробу-системи. Деформації слід розглядати з урахуванням їхньої безперервної участі в становленні та самозбереженні структури матеріалу. Спроможність неоднорідностей бетону та їхніх складових передавати, сприймати, перерозподіляти і релаксувати локальні та інтегральні деформації різного виду

визначає їхній структурний розвиток з виходом на оформлення структури інших рівнів. Деформації залежно від причин їх виникнення пропонується поділяти на ендо- та екзодеформації. Це обґрунтовано тим, що внутрішні та зовнішні впливи, на які реагує бетон при експлуатації виробу, відбуваються одночасно. Зумовлюється синхронний прояв деформацій у двох напрямках (рис. 1): «знизу – вверх» з рівня мікроструктури через макрорівень на рівень виробу та «зверху – вниз» з рівня виробу через макрорівень на рівень мікроструктури. Таким чином, розвиток деформацій має відбуватися у вигляді хвиль, які зворотно передаються між рівнями та підструктурами самих рівнів. Деформації можна представити як фактори ініціювання структурних змін на кожному рівні та водночас як конкретний результат прояву цих змін.

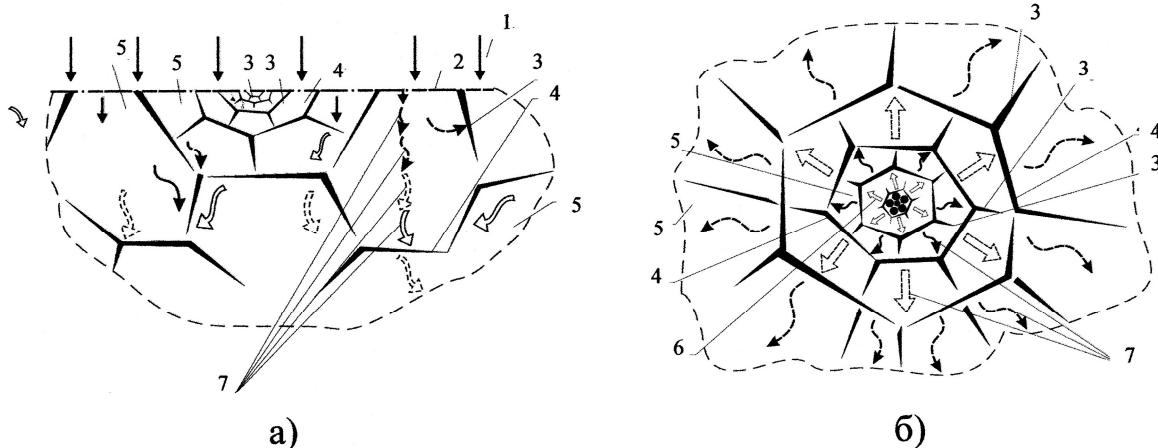


Рис. 1. Реакції різнорівневої структури матеріалу виробу на вплив зовнішніх (а) і внутрішніх факторів (б):

1 – зовнішні впливи; 2 – умовна границя поверхні матеріалу (виробу); 3 – технологічні тріщини; 4 – внутрішні поверхні розділу; 5 – структурні блоки; 6 – внутрішні впливи; 7 – реакції активних елементів на різних рівнях структурних неоднорідностей на зовнішні та внутрішні впливи

Зовнішні впливи сприймаються всіма рівнями неоднорідностей, що викликає переорганізацію їхньої структури. При цьому енергія деформування може частково розсіюватися на внутрішніх

поверхнях розділу та берегах тріщин або може спричинювати підростання тріщин чи перерозподілятися всередині рівнів і між ними. Структурні зміни, що реалізувалися, проявляють себе як вибірккові реакції

різномірної структури бетону на зовнішні впливи у вигляді градієнтів деформацій. Деформаційна хвиля сприймається іншим рівнем неоднорідностей і переходить по відношенню до нього в ранг внутрішніх факторів впливу. Це провокує подальші структурні зміни всіх взаємодіючих рівнів з підвищенням різноманіття параметрів їхніх складових. Разом з тим на рівні мікроструктури продовжуються процеси гідратації реліктових зерен в'язучого з локалізацією об'ємних і температурних деформацій у кластерних структурах. Формозміна границь розділу, ініційована градієнтами деформацій, забезпечує протилежний напрямок передачі деформаційних хвиль, що сприяє збільшенню структурного різноманіття бетону на всіх рівнях неоднорідностей.

Складна організація багаторівневої структури бетону дозволяє припустити

співіснування тріщин і ВПР в матеріалі виробів у вигляді сітки-павутини. Така сітка утворюється за принципом «сітки всередині сіток» (рис. 2). Інтегральна сітка включає індивідуальні локальні сітки, які складаються з власних сіток. Активна роль тріщин і ВПР в процесах структуроутворення та функціонування матеріалів дозволяє подати структуру бетону та структуру виробу у вигляді сітки тріщин і внутрішніх поверхонь розділу. Характеристики цих своєрідних сіток визначають неповторність структурного оформлення виробу на окремих рівнях неоднорідностей після закінчення технологічного етапу його життєвого циклу. Від геометричних параметрів різномірної сітки тріщин і ВПР залежить прояв потенційних можливостей виробу в період експлуатації.

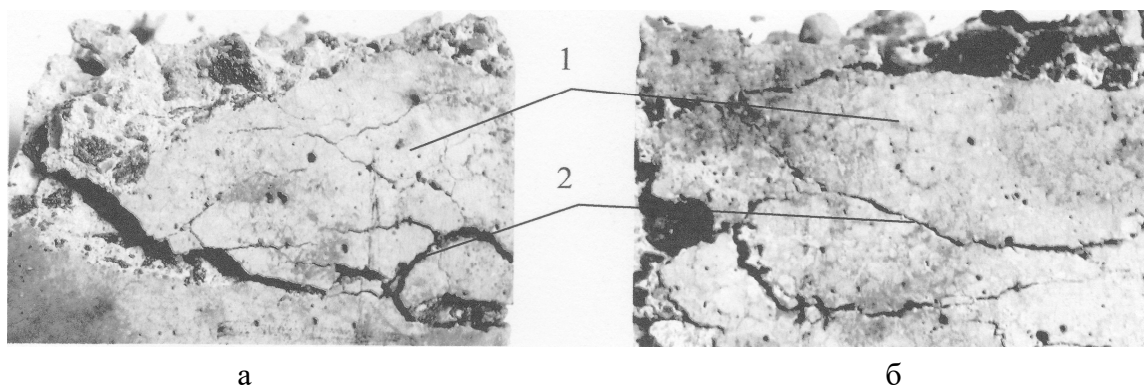


Рис. 2. Сітка тріщин і внутрішніх поверхонь розділу як активних елементів структури важкого бетону (а) і керамзитобетону (б):

- 1 – сітка тріщин і ВПР, що присутні в матеріалі до експлуатації виробу;
2 – магістральні тріщини (тріщини руйнування)

Будь-які впливи експлуатаційного середовища, що діють на будівельний виріб, сприймаються сіткою тріщин і внутрішніх границь розділу. Тріщини і ВПР здатні через зміну власних параметрів забезпечити необхідний інтервал часу для відновлювальних структурних перебудов. Відбувається самопідтримка матеріалом своєї цілісності, що дозволяє зберігати

властивості виробу на допустимому нормами рівні. Матеріал виробу адаптується до різного роду впливів шляхом зміни параметрів сіток тріщин і ВПР із включенням у роботу консервативних і метастабільних структурних складових [3]. Взаємовплив і взаємодія сіток активних елементів реалізується через внутрішньоструктурні та

міжструктурні зв'язки. Адекватний прояв структурних змін на зовнішні та внутрішні впливи забезпечує самозбереження кожного рівня структури бетону внаслідок локалізації зростання тріщин всередині окремих неоднорідностей, що запобігає їх злиттю в тріщину руйнування. Розрив міжструктурних зв'язків провокує зародження та розвиток магістральної тріщини, що поступово викликає втрату функцій матеріалу. Сприятливі зміни структури запобігають локальному накопиченню деформацій у матеріалі. Динамічність зв'язків сіток тріщин і ВПР на окремих рівнях неоднорідностей робить можливим релаксацію деформацій і стабілізацію загального стану бетону на рівні виробу. Для підвищення стійкості бетону необхідно створювати набори сіток тріщин і ВПР, які будуть гарантувати своєчасність прояву структурних змін при періодичних зовнішніх впливах.

Розвиток тріщин у матеріалах з блоковою структурою можна представити як дискретно-безперервний процес. Це пов'язано з покрововим підростанням тріщин після закінчення дії впливу. Поведінкові реакції бетону на дію вологих і температурних факторів проявляються у вигляді перебудови сіток тріщин і ВПР та повторюються від циклу до циклу. Проте результат змін, що відбулися в структурі матеріалу, залежить від попередньої трансформації сіток, прояв якої спадково зумовлюється їхнім початковим оформленням. Прояв ефектів адаптації, пов'язаних із саморозвитком тріщин, може реалізовуватися як трансформація тріщин у внутрішні поверхні розділу, які не мають головного атрибуту тріщини – устя (концентратора напружень і деформацій) [1]. Припиняється підростання тріщин і збільшується дискретність будови, що створює умови для локалізації деформацій і напружень в окремих блоках матеріалу. Це сприяє дисипації залишкової енергії на берегах тріщин і внутрішніх поверхнях розділу. Здатність тріщин і ВПР

перерозподіляти градієнти деформацій між окремими блоками перешкоджає їхньому локальному накопиченню, що веде до зниження інтегрального напружено-деформативного стану композитів.

Експериментальні дослідження підтвердили можливість підвищення стійкості бетонів на щільних і пористих заповнювачах за рахунок направленої організації їхньої структури шляхом забезпечення різноманіття умов взаємодії матричної складової з поверхнею заповнювачів на границі розділу між ними.

Були визначені коефіцієнти стійкості бетону та керамзитобетону за зміною показників втрати маси, відкритої пористості, водопоглинання, міцності при стиску та модуля пружності (таблиця).

Проведені дослідження показали, що пошкодженість бетонів збільшилась у середньому на 40 % (важкий бетон) і 30 % (керамзитобетон) після 100 циклів поперемінних зовнішніх впливів.

Показник коефіцієнта пошкодженості $K_{п1}$ був меншим при збільшенні показника коефіцієнта пошкодженості $K_{п}$. Порівняно з величиною пошкодженості бетонів традиційних складів бетони з вибірковою адгезією цементної матриці до поверхні заповнювачів мали структуру, при якій значення $K_{п}$ є більшими на 11-15 %, значення $K_{п1}$ меншими на 20-25 %. Це свідчить про те, що збільшення структурного різноманіття веде до формування структури, при якій початковий розподіл тріщин запобігає їх зростанню до розмірів, що є небезпечними для певного рівня неоднорідностей та всього матеріалу.

Бетони, організація структури яких була ініційована при початковій умові $R_A=R_K$, мали поліпшені значення властивостей. Показники міцності при стиску практично не змінювалися після циклів періодичних впливів, модуль пружності підвищився на 11 %, відкрита пористість знизилась на 7-10 %, водопоглинання змінилося не більше 5 %

(бетон) і 15 % (керамзитобетон), втрата маси склала до 2 %. Для бетонів при інших прийнятих співвідношеннях R_A/R_K показники міцності та модуля пружності зменшились до 5 % та 18 % відповідно при збільшенні водопоглинання на 3-13 % і

відкритій пористості на 11-14 %, втрата маси досягала 5 %. Збільшення пошкодженості свідчить про структурні зміни, завдяки яким властивості бетону підтримуються на рівні не нижче проектного.

Таблиця

Стійкість бетону та керамзитобетону при малоцикловій утомі

Номер циклу	$K_{ct}=f_{ck}^{N_{II}}/f_{ck}^{28}$			$K_{ct}=E^{N_{II}}/E^{28}$			$K_{ct}=W^{N_{II}}/W^{28}$			$K_{ct}=\Pi_o^{N_{II}}/\Pi_o^{28}$			$K_{ct}=m^{N_{II}}/m^{28}$		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Бетон															
T=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T=50	0,97	0,98	0,99	1,04	0,96	1,24	0,85	0,93	0,76	0,84	0,90	0,77	0,99	0,98	0,99
T=100	0,96	0,96	0,98	1,02	0,94	1,12	0,97	0,99	0,95	0,92	0,94	0,93	0,95	0,95	0,97
W=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W=50	1,02	1	1	1,28	1,11	1,32	0,90	0,97	0,88	0,88	0,93	0,88	0,98	0,98	0,99
W=100	1	0,98	0,99	1,22	1,02	1,29	1,04	1,03	1,0	0,99	0,98	1,0	0,95	0,95	0,98
Керамзитобетон															
T=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T=50	0,97	0,98	1	0,86	0,95	0,93	0,78	0,82	0,73	0,76	0,81	0,71	0,98	0,98	1
T=100	0,95	0,95	0,98	0,82	0,9	0,89	0,89	0,92	0,83	0,85	0,87	0,81	0,95	0,95	0,97
W=0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
W=50	1	1,01	1,03	1,11	1,17	1,03	0,92	1,01	0,96	0,91	0,96	0,98	0,99	0,97	0,99
W=100	0,97	0,99	0,99	1,07	1,12	0,99	1,12	1,15	1,16	1,06	1,08	1,16	0,96	0,95	0,96

Таким чином, забезпечення багатова-ріантності умов структуроутворення в початковий період дозволило одержати структури бетону та керамзитобетону з заданими наборами активних елементів. Регулювання різноманіттям структури на макрорівні дає змогу підвищити стійкість будівельних виробів і конструкцій, призначених для використання в умовах періодичних змін вологи і температури в зовнішньому середовищі.

Висновки. Аналіз результатів експериментальних досліджень і їхнє теоретичне обґрунтування дозволили заключити, що збереження початкового рівня фізико-технічних властивостей бетонів при малоцикловій утомі, викликаній циклами заморожування-відтавання і зволоження-висушування, залежить від початкової організації та своєчасної переорганізації

структури. Прояв ефектів адаптації пов'язаний переважно зі спонтанним розвитком тріщин і внутрішніх поверхонь розділу як активних елементів структури. Зміна параметрів тріщин і ВПР, що проявляється як зміна локальної та інтегральної пошкодженості матеріалу, являє собою реакції структури на вплив зовнішніх і внутрішніх факторів. Для забезпечення структур із заданими наборами активних елементів раціональним підходом є регулювання структурним різноманіттям на рівні макроструктури бетону. Направлена зміна співвідношення адгезійно-когезійних сил зв'язку на границі розділу між матричною складовою і поверхнею заповнювачів зумовлює одержання бетонів, які відзначаються підвищеною стійкістю при поперемінних температурних і вологісних впливах.

Наведені результати і висновки вказують на перспективність досліджень з виявлення факторів направленої формування складно організованої структури будівель-

них композитів з метою підвищення показників їхньої якості для використання в складних умовах експлуатації.

Список використаних джерел

1. Суханов, В. Г. Структура материала в структуре конструкции [Текст] / В. Г. Суханов, В. Н. Выровой, О. А. Коробко. – Одесса : Полиграф, 2016. – 244 с.
2. Чернявский, В. Л. Адаптация абиотических систем: бетон и железобетон [Текст] / В. Л. Чернявский. – Днепропетровск : ДНУЖТ, 2008. – 412 с.
3. Выровой, В. Н. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства [Текст] / В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов. – Одесса : ТЭС, 2010. – 169 с.
4. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов [Текст] / В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, А. Н. Бобрышев [и др.]. – Ташкент : ФАН, 1991. – 345 с.
5. Системный подход к разработке и управлению качеством строительных материалов [Текст] / Ю. М. Баженов, А. М. Данилов, И. А. Гарькина [и др.]. – М. : ПАЛЕОТИП, 2006. – 188 с.
6. Выровой, В. Н. Системный подход при анализе структуры строительных конструкций [Текст] / В. Н. Выровой, А. В. Дорофеев, В. Г. Суханов // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2008. – Вип. 41. – Ч. 1. – С. 133-139.
7. Formation of structure of high-strength composites with account of interactions between liquid phase and disperse particles [Text] / A. Plugin, E. Dedeneva, T. Kostyuk, D. Bondarenko, O. Demina // Open Access Journal «MATEC Web of Conferences». – V. 116. – DOI: 0.1051/mateconf/ 201711601010. – EDP Sciences. – 2017.
8. Гарькина, И. А. Строительные материалы как системы [Текст] / И. А. Гарькина, А. М. Данилов, Е. В. Королев // Строительные материалы. – 2006. – № 7. – С. 55-58.
9. Функции трещин в конструкциях как сложноорганизованных системах [Текст] // А. Н. Герега, В. Н. Выровой, В. С. Дорофеев, В. Г. Суханов // Материалы междунар. конф. «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов». – 2012. – С. 14-17.

Коробко Оксана Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри архітектурних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел: (096)36-90-522. E-mail: okskorobko71@gmail.com.
Выровой Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций Одеськой государственной академии строительства и архитектуры. Тел: (097)48-94-979. E-mail: vyrovoy@ukr.net.
Суханов Владимир Геннадійович, д-р техн. наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций Одеськой государственной академии строительства и архитектуры. Тел: (067)48-04-113. E-mail: suhan-ov@mail.ua.
Закорчемний Юрій Орестович, канд. техн. наук, доцент кафедри архітектурних конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури. Тел: (098)55-24-607. E-mail: zakorchemny@gmail.com.

Коробко Оксана Александровна, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурных конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел: (096)36-90-522. E-mail: okskorobko71@gmail.com.
Выровой Валерий Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел: (097)48-94-979. E-mail: vyrovoy@ukr.net.
Суханов Владимир Геннадиевич, д-р техн. наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел: (067)48-04-113. E-mail: suhanov@mail.ua.

Закорчемный Юрий Орестович, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурных конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры. Тел: (098)55-24-607. E-mail: zakorchemny@gmail.com.

Korobko Oksana, PhD (Tech.), associate professor, Department of Architectural Constructions Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel.: (096)36-90-522. E-mail: okskorobko71@gmail.com.

Vyrovoy Valery, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Production of Building Products and Constructions Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel: (097)48-94-979. E-mail: vyrovoy@ukr.net.

Sukhanov Vladimir, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Production of Building Products and Constructions Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel: (067)48-04-113. E-mail: suxanov@mail.ua.

Zakorchemny Yuri, PhD (Tech.), associate professor, Department of Architectural Constructions Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture. Tel: (098)55-24-607. E-mail: zakorchemny@gmail.com.

Статтю прийнято 01.11.2018 р.

УДК 624.014.2

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Д-р техн. наук В. Е. Волкова

ВДОСКОНАЛЕННЯ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ СТРИЖНЕВИХ СИСТЕМ

Д-р техн. наук В. Є. Волкова

REFINEMENT OF DYNAMIC MODELS OF THE ROD SYSTEMS

D. Sc. (Tech.) V. E. Volkova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156497>

Автором рассматривается возможность применения методов понижения размерности динамических моделей к стержневым системам со многими степенями свободы. В статье представлены результаты натурных исследований и численного моделирования динамического поведения решетчатой смотровой башни. Путем разделения на независимые подструктуры выполнено понижение размерности исходной динамической модели. В целях верификации полученных моделей меньшей размерности выполнено сопоставление результатов моделирования методом конечных элементов и данных натурального эксперимента.

Ключевые слова: стержневые системы, динамические модели, понижение размерности модели, верификация модели, натурный эксперимент, решетчатые башни.

Автором розглядається можливість застосування методів зниження розмірності динамічних моделей стосовно стрижневих систем з багатьма ступенями свободи. Об'єктом дослідження є гратчасті башни. Слід зазначити, що конструкції гратчастих бащ і оглядових майданчиків дуже чутливі до динамічних навантажень. Такі впливи можуть бути викликані не тільки дією вітру, льоду, землетрусами, ударами, вибухами, пішоходами, а й механічними відмовами деяких несучих елементів. Коливання, які збуджуються цими впливами, охоплюють широкий спектр частот. У сучасному аналізі динамічної поведінки механічних систем особлива увага направлена на розвиток складних комп'ютерних моделей. Однак зіставлення результатів чисельного моделювання і даних

натурних експериментів не завжди показує їхній задовільний збіг. Тому застосування дискретних моделей має ряд обмежень. Досліджуване спорудження включає в себе велику кількість різних підсистем і елементів: внутрішнє і зовнішнє ядра жорсткості, оглядові майданчики, сходи і огорожувальні конструкції. Елементи несучих конструкцій гратчастої бапти були виготовлені зі сталі, а елементи ходових площадок та огорож – з деревини. Внаслідок цього динамічна модель об'єкта містила понад тисячу параметрів, частина з яких відома з певною часткою ймовірності. При побудові динамічної моделі була виконана дискретизація вихідної системи і отримана система рівнянь методу скінченних елементів. Основне завдання дослідження полягає в редукації моделі і виявленні невеликої кількості змінних, що визначають динаміку системи., Тобто пошуку енергетичного «ядра» системи. У статті представлені результати натурних досліджень і чисельного моделювання динамічної поведінки гратчастої оглядової вежі. Шляхом поділу на незалежні підструктури виконано зниження розмірності вихідної динамічної моделі. З метою верифікації отриманих моделей меншої розмірності виконано зіставлення результатів моделювання методом кінцевих елементів і даних натурального експерименту.

Ключові слова: стрижневі системи, динамічні моделі, зниження розмірності моделі, верифікація моделі, натурний експеримент, гратчасті бапти.

The author considers the possibility of applying methods for reducing the dimensionality of dynamic models to rod systems with many degrees of freedom. The research object is the latticed tower. It should be noted that the designs of lattice towers and viewing platforms are very sensitive to dynamic loads. Such influences can be caused by the action of wind, ice, earthquakes, impacts, explosions, pedestrians, but also mechanical failures of some load-bearing elements. The vibrations excited by these effects cover a wide range of frequencies. In the modern analysis of the dynamic behavior of mechanical system, special attention is directed to the development of complex computer models. However, the comparison of the results of numerical simulation and the data of full-scale experiments does not always show their satisfactory coincidence. Therefore, the use of discrete models meets a number of limitations. The structure under study includes a large number of different subsystems and elements. Namely, the inner and outer hardness cores, observation platforms, stairs and enclosing structures. Elements of load-bearing structures of the lattice tower were made of steel, and elements of observation platforms and fences were made of wood. As a result, the dynamic model of the object contained more than a thousand parameters, some of which are known with a certain probability. Developing the dynamic models the initial system was sampled and a system of governing equations of the finite element method were obtained. The main objective of the study is to reduce the model and to identify a small number of variables that determine the dynamics of the system search for the energy "core" of the system. The results of field studies and numerical simulation of the dynamic behavior of a latticed observation tower are presented. By dividing into independent substructures the dimension of the original dynamic models are reduced. In order to verify the obtained models of lower dimension, the simulation results are compared by the finite element method and the data of the full-scale experiment.

Keywords: rod systems, dynamic models, reduction of the model dimension, model verification, full-scale experiment, lattice towers.

Введение. При анализе динамического поведения инженерных сооружений в ряде случаев возникает ситуация, когда существующая модель большой размерности может быть упрощена без

существенного изменения ее основных модальных характеристик. Это явление имеет место в тех случаях, когда наибольший интерес представляет поведение сооружения в целом, а не

отдельных ее элементов. Результаты, полученные для упрощенных моделей, более доступны для качественного анализа и дальнейших вычислений.

Для исследования колебаний механических систем большой размерности существует ряд методов редукции расчетных моделей, основанные на исключении некоторых физических координат или подсистем [1-3]. Они включают в себя методы разделения на слабосвязанные подсистемы, а также методы агрегирования элементов с различным уровнем энергии. Основным и наиболее ответственным этапом применения данных метод является введение критериев слабых взаимодействий между отдельными подсистемами, формирующими модель. Редуцированные таким способом модели должны качественно отражать динамическое поведение исследуемого объекта и сохранять заданную степень точности расчета в исследуемом диапазоне частот.

Анализ последних исследований и публикаций. В современном анализе динамического поведения механических систем особое внимание направлено на развитие сложных компьютерных моделей. Данные модели, как правило, используются для решения двух основных типов задач. Первая задача состоит в оценке реакции исследуемой механической системы на внешние возмущения, в то время как вторая задача заключается в предсказании влияния изменений или модификаций самой механической системы на ее динамические характеристики.

К сожалению, существующая база данных полномасштабных динамических исследований решетчатых башен очень ограничена [1-4]. В работе Kitipornchai [2] обнаружено, что поведение решетчатых башен нелинейно. Это можно объяснить наличием зазоров и возможностью проскальзывания в узлах и соединениях. Поведение болтовых соединений линейно при нагрузках, не превышающих величину

силы трения в соединении. Однако при больших значениях нагрузок наблюдается проскальзывание. Это приводит к проявлению локальной нелинейности. Нагрузка на проскальзывание болта связана с его предварительным натяжением [3], который является параметром, что не всегда хорошо контролируется на практике. Проскальзывание соединения приводит к потере жесткости и увеличению уровня затухания. Это подчеркивает возможную зависимость поведения решетчатых башен от уровня нагрузки. Glanville [4] были испытаны телекоммуникационные башни и полученные коэффициенты демпфирования от 0,5 % до 1 % были измерены на реакции свободных колебаний после вынужденной вибрации низкого уровня. Ostendorp [5] протестировал решетчатую башню высотой 30 м. Коэффициент демпфирования измерялся по временным процессам свободных колебаний после разгрузки и изменялся от 0 до 40 % со средним значением 17 %. В этом исследовании было установлена зависимость между коэффициентом демпфирования и уровнем нагружения.

Цели и задачи исследования. Цифровые компьютеры генерируют прогнозы динамического поведения механических систем на основе дискретных моделей. Однако сопоставление результатов численного моделирования и данных натуральных экспериментов не всегда показывает их удовлетворительное совпадение. Поэтому применение дискретных моделей встречает ряд ограничений.

Основная задача данного исследования состоит в редукции модели и выявлении небольшого числа переменных, определяющих динамику системы, т. е. поиске энергетического «ядра» системы. Путем разделения на независимые подструктуры выполнено понижение размерности исходной динамической модели. В целях верификации полученных моделей меньшей размерности выполнено сопоставление результатов моделирования

методом конечных элементов и данных натурального эксперимента.

Основная часть исследования. При исследовании динамических систем со многими степенями свободы естественны подходы декомпозиции. Основная проблема редукции моделей механических систем состоит в выявлении небольшого числа переменных, определяющих их динамическое поведение. Однако произвольный выбор управляющих переменных малоэффективен [6].

Особенностью колебаний механических систем со многими степенями свободы есть проявление слабых взаимодействий между подсистемами. Декомпозиция с помощью разделения на независимые подструктуры возможна в тех случаях, когда колебания в слабосвязанных подсистемах происходят практически независимо [6]. А именно, собственные частоты связанной системы близки с точностью до некоторого малого параметра ϵ к собственным частотам несвязанных парциальных подсистем. Декомпозиция модели может быть также выполнена и с помощью агрегирования элементов. При таком подходе число степеней свободы механической модели уменьшается вследствие объединения низкочастотных и высокочастотных элементов. В последние годы получили распространение также численные методы понижения размерности динамических моделей. Привлекательной чертой таких методов, несомненно, является возможность их реализации в программных продуктах. Однако, как отмечается в работах [7, 8], такие методы являются в значительной мере эвристическими, и результаты их применения не всегда удовлетворительны.

Объектом исследования является смотровая башня высотой 36,48 м, которая расположена в Дзинтари (город Юрмала, Латвия). Конструктивная схема башни представлена на рис. 1. Сооружение состоит из усиленного внутреннего ядра жесткости с размерами 1500x1500 мм из

труб с поперечным сечением 200x200x8 и наружным кольца размером 4240x4240 мм (рис. 1), выполненного из труб с поперечным сечением 140x140x5 мм. Все несущие элементы башни, а именно внутреннее и внешнее ядро жесткости, платформы и лестницы, выполнены из стали. Элементы облицовки фасада и облицовки ядра жесткости выполнены из древесины. Вертикальные связевые элементы отсутствуют.

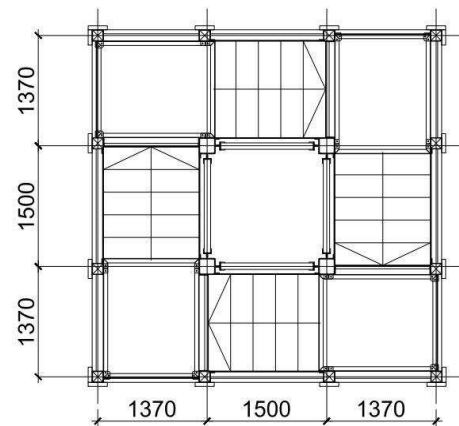


Рис. 1. Схема поперечного сечения смотровой башни

Для оценки динамических свойств башни была создана трехмерная модель метода конечных элементов. Модальный анализ данного сооружения был выполнен в программном пакете STRAP 12.5 [9]. Основные частоты и формы колебаний структурной системы были определены путем решения уравнения незатухающих свободных колебаний [10]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0, \quad (1)$$

где M – матрица массы;
 K – матрица жесткости;
 \ddot{u} – вектор ускорения;
 u – вектор перемещений.

Численное решение уравнения было получено методом итерации подпространств.

Чтобы оценить влияние отдельных подсистем на динамическое поведение сооружения в целом, было рассмотрено три динамические модели [10]. Первая упрощенная модель сооружения включала в себя только элементы внутреннего ядра жесткости. Вторая модель включала в себя

элементы как внутреннего, так и внешнего ядер жесткости. При формировании третьей модели к элементам второй модели были присоединены элементы лестничных маршей и ходовых площадок. Результаты модального анализа для всех трех моделей представлены в таблице.

Таблица

Результаты численного моделирования

Модель	Описание модели	Частоты форм колебаний, Гц		
		1-я форма	2-я форма	3-я форма
1	Только внутреннее ядро жесткости	1.521	1.521	6.051
2	Внутреннее и внешнее ядра жесткости	0.874	0.874	2.031
3	Внутреннее и внешнее ядра жесткости и лестницы	1.506	1.511	2.010

Особенностью конструктивной схемы исследуемого сооружения является симметрия элементов внешнего и внутреннего ядер жесткости относительно центральных осей (рис. 1), вследствие чего частоты первой и второй форм изгибных колебаний решетчатой башни для первой и второй модели близки. Это также иллюстрируется в таблице. Однако данная закономерность не наблюдается для третьей модели, т. к. введение дополнительных элементов, а именно лестниц и ходовых площадок, нарушило симметрию модели относительно центральных осей.

Анализируя третью модель, заметим, что лестницы увеличивают жесткость башни в горизонтальном направлении. Вследствие этого частоты колебаний по 1 и 2 модам возрастают. Как и ожидалось, фундаментальные частоты формы первой и второй мод главным образом зависят от жесткости внутреннего ядра. Внешнее ядро не имеет вертикальных связей и жесткость его незначительна. Таким образом, оно выступает в качестве присоединенной массы, снижая частоту колебаний всей башни.

Результаты натурного эксперимента.
Для качественного исследования

диссипативных и упругих характеристик были проведены динамические испытания решетчатой башни в Дзинтари [11]. Внешнее возмущение создавалось движением двух человек во времени с метрономом при каждой собственной частоте башни. Внешнее возмущение прекращалось при достижении резонансных режимов колебаний, затем наблюдались свободные колебания башни до полной остановки. Испытания на вынужденную вибрацию проводились в спокойных атмосферных условиях для устранения любых аэродинамических эффектов. В ходе экспериментов были измерены и записаны вибрационные ускорения точек верхней площадки башни (рис. 2).

Для записи ускорений использовались пять акселерометров трехосных USB акселерометров модели X6-1A. Частота дискретизации сигналов датчиков составляла 160 Гц. Это значение превышало наибольшее значение модальной частоты, полученное при численном моделировании, и обеспечивало корректность обработки сигналов. Вес датчиков был невелик – 55 г – и поэтому не мог вносить помехи в инерционные характеристики объекта.

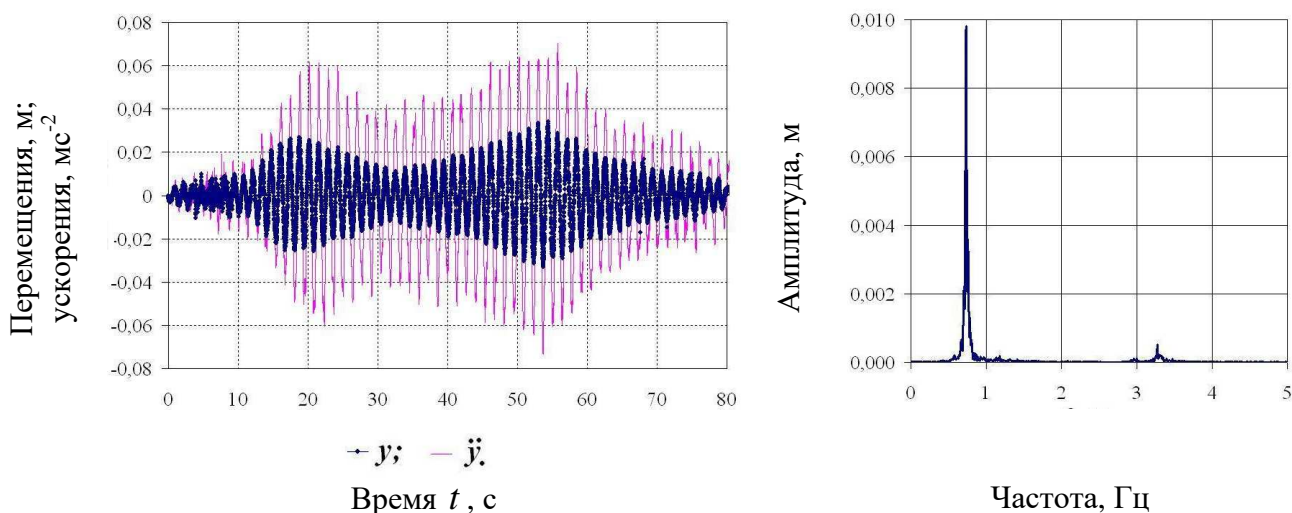


Рис. 2. Экспериментальные записи временных процессов и спектральные характеристики

Учитывая, что точный момент окончания действия внешнего возмущения не регистрировался, то отклик фиксировался на протяжении всего эксперимента, вплоть до перехода конструкции в состояние покоя. В программном комплексе Matlab было выполнено быстрое преобразование Фурье записей ускорений. Типичные записи временных процессов и спектральные характеристики представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2, сигнал состоит из нескольких частот: отклика конструкции на ее первой собственной частоте, которая составляет около 0.736 Гц; отклика конструкции на частоте 3.27 Гц; высокочастотных компонентов с частотой более 9 Гц, которые могут быть отнесены к шуму или вкладу колебаний более высоких мод.

Отметим, что экспериментальное значение частоты первой формы колебаний ниже, чем ее численная оценка (таблица). Это можно объяснить влиянием инерции деревянных элементов фасада, которым

пренебрегли при численном моделировании.

Выводы. Сопоставление результатов численного моделирования и экспериментальных данных позволяет утверждать, что жесткостные и инерционные характеристики внутреннего ядра жесткости определяют динамическое поведение решетчатой башни. В то же время влияние слабосвязанных систем элементов фасада вызывает и приводит к увеличению диссипации энергии и незначительному снижению собственных частот. Таким образом, в реальных механических системах слабые взаимодействия между подсистемами играют двоякую роль. С одной стороны, повышается виброизоляция подсистем, что препятствует передаче вибрации. Однако, с другой стороны, усложняется процедура мониторинга технического состояния конструкции, выявления дефектов из-за слабой передачи энергии между подсистемами внутри системы.

Список использованных источников

1. Da Silva, J.G.S. Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers [Text] / J.G.S. Da Silva, P.C.G.D. Da Vellasco, S.A L. De Andrade, M.I.R. De Oliveira // Journal of Constructional Steel Research. – 2005. – Vol. 61. – P. 1108–1134.

2. Kitipornchai, S. Effect of bolt slippage on ultimate behaviour of lattice structures [Text] / S. Kitipornchai, F.G.A. Al-Bermani, A.H. Peyrot // ASCE Journal of Structural Engineering. – 1994. – Vol. 120, Issue 8. – P. 2281- 2287.
3. Ungkurapinan, N. Joint slip in steel electric transmission towers [Text] / N. Ungkurapinan, S. Chandrakeerthy, S.R. De, R.K.N.D. Rajapakse, S.B. Yue // J. Engineering Structures. – 2003. – Vol. 25. – P. 779-788.
4. Glanville, M.J. Full-scale damping measurements of structures in Australia [Text] / M. J. Glanville, K.C.S. Kwok, R.O. Denoon // J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1996. – Vol. 59. – P. 349-364.
5. Ostendorp, M. Damping Characteristics of a Steel Lattice Structure [Text] / M. Ostendorp // Proceedings of the 15th ASCE Structures Congress, April 16, 1997, Portland, Oregon. – P. 358-362.
6. Банах, Л. Я. Методы декомпозиции и редукции динамических моделей при колебаниях механических систем [Текст] / Л. Я. Банах // Вестник научно-технического развития. – 2012. – Т. 58, № 6. – С. 3–8.
7. Kurbatov, V. G. Subspace methods of approximate solving of differential equations from the point of view of functional calculus [Text] / V. G. Kurbatov, I. V. Kurbatova // Eurasian Math. Journ. – 2012. – Vol. 3, № 4. – P. 53–80.
8. Mitsuharu, Kurata1. Dynamic reduction and recovering based on substructuring method [Text] / Mitsuharu Kurata1, Buntara Sthenly Gan1, Eiji Nouchi1 // Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURO DYN 2014 Porto, Portugal, 30 June – 2 July 2014. – P.1905–1909.
9. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – 4-е изд., перераб. – М. : Издательство СКАД СОФТ, 2011 – 736 с.
10. Gaile, L. Analysis of Dynamic Parameters of Observation Towers in Latvia [Text] / L.Gaile // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference. Volume 11 – P. 57-62
11. Volkova, V. E. Experimental qualitative identification of damping and stiffness characteristics of lattice towers [Electronic source] / V.E. Volkova, L. Gaile, L. Pakrastins // 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 251 012108 DOI: 10.1088/1757-899X/251/1/012108 EID: 2-s2.0-85034448884/

Волкова Вікторія Євгенівна, д-р техн. наук., професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка». Тел.: (050)561-5562. E-mail:drvev09@gmail.com.

Волкова Виктория Евгеньевна, д-р техн. наук, профессор кафедры строительства, геотехники и геомеханики Национального технического университета «Днепроvская политехника». Тел.: (050)561-5562. E-mail:drvev09@gmail.com.

Volkova Viktorija Eugene, D. Sc. (Tech.), professor, Department of Construction, Geotechnics and Geomechanics, National Technical University “Dnipro Polytechnic”. Tel: (050)561-5562. E-mail:drvev09@gmail.com.

Статтю прийнято 27.11.2018 р.

УДК 626/627

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГРАВІТАЦІЙНИХ СТОЯНІВ НА СКЕЛЬОВІЙ І НЕСКЕЛЬОВІЙ ОСНОВАХ ЗА КРИТЕРІЄМ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

Канд. техн. наук А. О. Мозговий

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГРАВИТАЦИОННЫХ УСТОЕВ НА СКАЛЬНОМ И НЕСКАЛЬНОМ ОСНОВАНИЯХ ПО КРИТЕРИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА

Канд. техн. наук А. А. Мозговой

PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GRAVITY ABUTMENTS ON ROCK AND NON-ROCK FOUNDATIONS BY THE CRITERIA OF STABILITY AGAINST DISPLACEMENT OF THE GRAVITY ABUTMENTS ON THE EXAMPLE OF HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE

PhD (Tech.) A. O. Mozgovuy

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.181.2018.156502>

У даній роботі отримав подальший розвиток метод оцінки надійності гравітаційних стоянів за критерієм втрати стійкості проти зсуву. При цьому ураховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, які під час експлуатації сприймають стояни, а також кореляційні залежності між ними. Крім того, ураховано випадковий характер механічних властивостей ґрунту основи і кореляційні залежності між ними. Виконано чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану гравітаційних стоянів на скельній і нескельній основах гідровузлів Дніпровського каскаду. Метод може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності каскадів гідровузлів.

Ключові слова: гравітаційний стоян, природні фактори, імовірнісна оцінка надійності, каскад гідровузлів.

В данной работе получил дальнейшее развитие метод оценки надежности гравитационных устоев по критерию потери устойчивости против сдвига. При этом учтен случайный характер внешних нагрузок и воздействий, которые в процессе эксплуатации воспринимают устои, а также корреляционные зависимости между ними. Учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Выполнена численная вероятностная оценка риска достижения предельного состояния гравитационных устоев на скальном и нескальном основаниях гидроузлов Днепровского каскада. Метод может использоваться при вероятностных расчетах надежности каскадов гидроузлов.

Ключевые слова: гравитационный устой, природные факторы, вероятностная оценка надежности, каскад гидроузлов.

When calculating and designing modern hydraulic structures, it becomes necessary to assess their reliability and safety based on probabilistic methods.

This work further develops the method for assessing reliability of gravity abutments by the criteria of stability loss against displacement. The work considers the random nature of the external

loads and impacts, which the gravity abutments bear during operation, as well as correlations between them. It also considers the random nature of mechanical properties of the foundation soils and correlations between them.

For solving this problem, the method of statistical tests (Monte Carlo method) was applied, which is widely used for assessing probabilistic reliability of complex technical systems. In applying the method of statistical tests to assess the reliability of a complex technical system, it is necessary to perform a significant number of statistical tests. This implies determination of internal parameters of the system during each statistical test.

A numerical probabilistic assessment of the risk when the gravity abutments on rock and non-rock foundations at hydro schemes of the Dnieper Cascade reach the boundary conditions has been performed. Confidence limits of the probability of losing stability of the gravity abutments against displacement are determined; a number of statistical tests required to achieve confident accuracy is determined.

Correctness of the obtained results is confirmed by their correspondence with the reliability assessment of the gravity abutments of the Dnieper cascade by deterministic analyses using the method of boundary conditions.

In the future, the proposed method could be used in probabilistic reliability analyses of hydraulic structures and cascades of hydro schemes, taking into account the correlations between natural factors: wind, ice, and hydrological characteristics, as well as temperature loads and impacts.

Keywords: gravity abutment, natural factors, probabilistic reliability assessment, cascade of hydro schemes.

Вступ. Оцінка безпеки і надійності сучасних гідротехнічних споруд під час їхнього розрахунку і проектування на основі імовірнісних методів регламентована нормативними документами [1–2]. Гравітаційні стояни на скельовій і нескельовій основах є достатньо поширеними серед спеціальних типів споруд гідровузлів як в Україні, так і у світі.

Актуальність даної роботи обумовлена тим, що надійність гравітаційних стоянів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому, тому постає проблема дослідження надійності гравітаційних стоянів на скельовій і нескельовій основах, які входять до складу споруд водопідпільного фронту, на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підходи щодо імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд з урахуванням мінливості природно-кліматичних впливів, гідрологічних, сейсмічних впливів, а також

недопущенням виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах і гідровузлах наведено в закордонних роботах [3–10]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку, який існує між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд.

Питання імовірнісної оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів, розроблення критеріїв їхньої надійності, статистичні методи аналізу їхнього стану з урахуванням мінливості природних факторів, прогнозування аварійності гідротехнічних споруд, статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на території України, дослідження ризику досягнення граничного стану на основі імовірнісних методів гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду розглянуто в роботах [11–27].

Не вирішеною раніше частиною проблеми є те, що існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема

гравітаційних стоянів на скельовій і нескельовій основах, не враховують певні кореляційні залежності [20], які існують між природними факторами, що є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів [21–27].

Визначення мети та завдання дослідження. Завданням роботи є розроблення алгоритму імовірнісної оцінки надійності стоянів на скельовій і нескельовій основах з урахуванням кореляційних залежностей між природними факторами – кореляційні залежності між гідрологічними характеристиками водотоку, температурою і амплітудою коливань температур зовнішнього повітря, кореляційні залежності між характеристиками ґрунту основи.

Метою роботи є розроблення і апробація алгоритму на гравітаційних стоянах гідровузлів Дніпровського каскаду з отриманням чисельного значення імовірності виникнення аварії на зазначених гідротехнічних спорудах.

Основна частина дослідження. Нижче наведено характеристики стоянів на скельовій і нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду, які є найбільш

небезпечними з точки зору досягнення граничних станів.

Київський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу. Порожнини комірок засипані піском. Позначка підшви стояна +74.500 м, позначка верху стояна +106.000 м, ширина стояна по основі 22.20 м (рис. 1). Основа – дрібнозернисті піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Канівський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу зі шпунтовою діафрагмою в основі. Порожнини комірок засипані піском. Позначка підшви стояна +62.500 м, позначка верху стояна +88.800 м, ширина стояна по основі 21.40 м (рис. 2). Основою слугують піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Кременчуцький гідровузол. Стояни залізобетонні кутикового профілю. Пазухи стоянів засипані інертними матеріалами. Позначка підшви стояна +54.500 м, позначка верху стояна +85.000 м, ширина стояна по основі 20.00 м (рис. 3). Основою слугують граніти. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

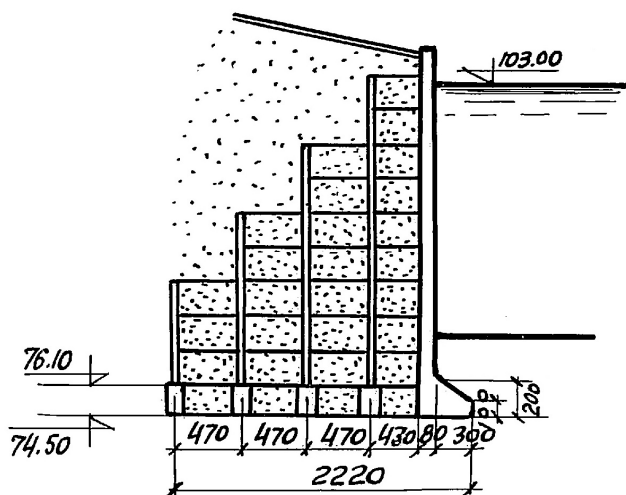


Рис. 1. Схема низового лівобережного стояна греблі з ґрунтових матеріалів Київського гідровузла (розміри в сантиметрах)

Каховський гідровузл. Стояни залізобетонні кутикового профілю. Пазухи стоянів засипані інертними матеріалами. Позначка підшови стояна -16.050 м, позначка верху стояна +8.500 м, ширина стояна по основі 25.70 м. Основою слугують дрібнозерністі піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

У роботах [22, 27] досліджено імовірнісну надійність залізобетонних конструкцій стін камер шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати міцності, стійкості проти зсуву і спливання за детерміністичною методикою за методом граничних станів, які засвідчили, що вказані споруди за критеріями втрати міцності і спливання мають значний запас надійності, наприклад шлюз Канівського гідровузла: розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості проти спливання для основного сполучення навантажень $k_e=2.98$ (нормативний - $k_n=1.09$); для особливого сполучення навантажень $k_e=2.95$ ($k_n=0.98$), тому в даному дослідженні за критерій настання граничного стану стоянів прийнято критерій стійкості проти зсуву.

Перевірка надійності гравітаційних стоянів за критерієм стійкості проти зсуву. Розрахунки за детерміністичною методикою виконуються для основного і особливого сполучення навантажень згідно з умовою [1]

$$\gamma_n \times \gamma_{lc} \times F \leq \gamma_c \times R, \quad (1)$$

де F – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням γ_f ;

R – узагальнена несуча здатність споруди чи основи;

γ_{lc} – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень $\gamma_{lc}=1.0$; для особливого – $\gamma_{lc}=0.9$;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, приймається $\gamma_c=1.1$;

γ_n – коефіцієнт надійності, приймається $\gamma_n=1.25$ для споруд класу наслідків СС3, $\gamma_n=1.2$ для споруд класу наслідків СС2-1.

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води; силовий вплив води, що фільтрується.

3. Температурні впливи.

4. Вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів.

5. Власна вага і тиск ґрунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

Для оцінки ризику втрати міцності, стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (1) доцільно подати як

$$k = \frac{R}{F} \geq k_n = \frac{\gamma_n \times \gamma_c}{\gamma_c}, \quad (2)$$

де k – розрахункове значення коефіцієнта запасу стійкості;

k_n – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: стояни Кременчуцького, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень $k_n=1.14$; для особливого сполучення навантажень $k_n=1.02$; стояни Київського, Канівського, Дніпродзержинського гідровузлів: для основного сполучення навантажень $k_n=1.09$; для особливого сполучення навантажень $k_n=0.98$.

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: стоян Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.48$ (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву), для особливого сполучення навантажень $k_c=1.55$; стоян Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.44$, для особливого сполучення навантажень $k_c=1.49$; стоян Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.53$; для особливого сполучення навантажень $k_c=1.41$; стоян Дніпродзержинського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.56$, для особливого сполучення навантажень $k_c=1.39$; стоян Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.54$; для особливого сполучення навантажень $k_c=1.47$.

Розрахункові коефіцієнти запасу стійкості на зсув не перевищують нормативних, тому отримані результати свідчать, що за детерміністичною методикою стійкість стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду забезпечена.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву гравітаційних стоянів передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їхніх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву гравітаційного стояня.

Критерій настання граничного стану стоянів на гідровузлах Дніпровського каскаду є статистично залежним, тому що його виникнення обумовлено позначками рівнів води у верхніх б'єсах гідровузлів.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні рівняння зв'язку має вигляд

$$k = \frac{(V-W)tg\phi + c \cdot A_n}{F}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти зсуву;

V – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

W – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

$tg\phi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя;

c – питоме зчеплення;

A_n – площа подошви споруди;

F – узагальнена сила зсуву.

При нескельовій основі доданком $c \cdot A_n$ у формулі (3) можна знехтувати.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи стояня A_n , м², інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma_b}=0.02$; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma_r}=0.06$.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pZ позначки рівня води Z , м, перед стояном. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між ними по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро по гідровузлах каскаду наведено в роботі [20]. За значенням pZ визначається квантиль – позначка рівня води Z , м, перед стояном. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду існує функціональна залежність [20], тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності pZ для стоянів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою. Будується залежність між рівнями верхнього Z_i , м, і нижнього б'єсів $Z_{НБ}$, м.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі стояня pW_f . За значенням імовірності визначається

квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f , кН.

За значеннями рівнів Z_i , м, і $Z_{НБ}$, м, визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки $W_{ГЗ}$, кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність щільності ґрунту оберненої засипки ρ_{gr} , за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту ρ_{gr} .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $\rho_{tg\phi_g}$, за якою визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя $tg\phi_g$. За значеннями ρ_g і $tg\phi_g$ визначається сила бічного тиску ґрунту оберненої засипки на стінку стояна.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі стояна pW_f . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f , кН.

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, району Вранча і Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їхню сейсмічну активність опрацьовано в роботі [28]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно з роботою [29].

Під час виконання одного статистичного випробування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів pJr , розподілені від 0 до 1 у Карпатах, районі Вранча, Криму. За значеннями pJr визначаються квантилі – бальність землетрусів Jr , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається

найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування стояна [30].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу Jr у криву розподілу максимального сейсмічного впливу J за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) від максимальної бальності землетрусів J , бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на стоян задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродинамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження відповідно до роботи [31] визначено лінійно-спектральним методом. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження S , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) стояна. Визначається сейсмічний гідродинамічний тиск води. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води E_{psg} , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) стояна.

Визначаються рівнодівні вертикальних сил V і W і горизонтальних сил F , що діють на гравітаційний стоян. При цьому ураховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження.

Характеристики ґрунту основи $tg\phi$ і c задані випадковими величинами відповідно до норм проектування основ гідротехнічних споруд [30, 31] за нормальним законом розподілу, як випадкові корельовані величини, які підкорюються нормальному закону, що визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування $m_{tg\phi}$, m_c , середньоквадратичні відхилення $\sigma_{tg\phi}$, σ_c , коефіцієнт кореляції $r_{tg\phi c}$. Визначається

кореляційний момент $K_{tg\phi c}$. Коефіцієнт варіації прийнято $C_v=0.122$.

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя $ptg\phi$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу з наведеними вище параметрами $m_{tg\phi}$, $\sigma_{tg\phi}$ визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя $tg\phi$. Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{tg\phi c}$, $\sigma_{tg\phi c}$. За відомою імовірністю величини питомого зчеплення pc , із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення c , кПа.

Розглядається схема плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні. Обчислюється значення коефіцієнта стійкості на зсув за формулою (3). Розрахунок виконується методом статистичних випробувань N разів. Кількість випробувань, при яких $k < 1$, віднесена до загальної кількості

випробувань N і визначає величину ризику настання граничного стану гравітаційного стояна за весь строк служби. Значення щорічної імовірності ризику досягнення граничного стану стояна обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^{\frac{1}{T}}, \quad (4)$$

де p – щорічна імовірність настання граничного стану;

pr – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

T – призначений строк служби, роки,

і виконується порівняння з допустимою величиною.

Результати розрахунків ризику настання граничного стану гравітаційних стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Таблиця

Результати оцінки імовірності втрати стійкості проти зсуву стоянів

Кількість статистичних випробувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби T , рік	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, рік ⁻¹	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, рік ⁻¹
Стоян Київського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
1.52×10^5	9.98×10^{-3}	2.00×10^{-4}	5×10^{-4}
Стоян Канівського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
2.92×10^5	5.24×10^{-3}	1.05×10^{-4}	5×10^{-4}
Стоян Кременчуцького гідровузла (клас наслідків СС3)			
2.26×10^7	6.80×10^{-5}	6.80×10^{-7}	5×10^{-5}
Стоян Дніпродзержинського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
3.84×10^7	4.01×10^{-5}	8.00×10^{-7}	5×10^{-4}
Стоян Каховського гідровузла (клас наслідків СС3)			
5.57×10^5	2.75×10^{-3}	2.76×10^{-5}	5×10^{-5}

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться в межах довірчого інтервалу. Межі довірчого інтервалу обчислені за формулами роботи [32].

Висновки. Удосконалено методику оцінки надійності гравітаційних стоянів на скельовій і нескельовій основах за критеріями втрати стійкості проти зсуву. Ураховано імовірнісний характер

навантажень і впливів, механічних властивостей основи, кореляційні залежності між природними факторами. Методика апробована на прикладі гравітаційних стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Список використаних джерел

1. Гідротехнічні споруди. Основні положення: ДБН В.2.4–3:2010. – [Чинний від 2011–01–01]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
2. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2–14–2009. – [Чинний від 2009–12–01]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 30 с. – (Державні будівельні норми України).
3. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management [Text] / FEMA P–1025 : Catalog №14353–1. – Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2015. – 49 p.
4. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower [Text] : Chapter 1. – Washington : FERC, – 2016. – 77 p. – (Federal energy regulatory commission, Division of dam safety and inspections).
5. Probabilistic Seismic Hazard Analysis [Text]: Chapter R20. – Washington : DRAFT, – 2014. – 84 p. – (Engineering guidelines).
6. Arbeitshilfe zur DIN 19700 für hochwasserrückhaltebecken [Text] / Landesanstalt für umwelt, messungen und naturschutz. – Baden–Württemberg : JVA Mannheim @ Druckerei. – 2007. – 143 p. – (Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz).
7. Guide to interpretive documents for essential requirements, to EN 1990 and to application and use of Eurocodes [Text]: Handbook 1. – UK Watford : Garston, 2004. – 155 p. – (Basis of structural design).
8. Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples 1990 and to application and use of Eurocodes [Text] : Handbook 2. – Prague, 2005. – 254 p. – (Reliability backgrounds).
9. Probabilistic model code [Text]. Part 1 – Basis of design. JCSS working materials [Електронний ресурс] // JCSS. – 2000. – 62 p. – Режим доступу: <http://www.jcss.ethz.ch>.
10. Design regulations of Swedish board of housing, building and planning [Text] / Swedish Board of housing, building and planning. – Sweden, Karlskrona : Boverket, 2000. – 187 p. – (Mandatory provisions and general recommendations). ISBN: 91–7147–616–4, ISSN: 1100 0856.
11. Westberg, M. Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet. Bakgrundsbeskrivning till framtagande av ”Probabilistic model code for concrete dams” [Text] / M. Westberg, F. Johansson. – Sweden : Energiforsk, 2016. – 50 p. ISBN 978–91–7673–291–5
12. Altarejos-García, L. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis [Text] / L. Altarejos-García, I. Escuder-Bueno, A. Serrano-Lombillo [and others] // Structural Safety. – 2012. – Vol. 36–37. – P. 1–13.
13. Gaspar, A. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields [Text] / A. Gaspar, F. Lopez-

Caballero, A. Modaresi-Farahmand-Razavi [and others] // *Engineering Structures*. – 2014. – Vol. 65. – P. 99–110.

14. Lupoi, Alessio. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams [Text] / Alessio Lupoi, Carlo Callari // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2012. – Vol. 8. – Issue 10. – P. 985–998.

15. Morales-Nápoles, O. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification [Text] / O. Morales-Nápoles, D. J. Delgado-Hernández, D. De-León-Escobedo [and others] // *Structure and Infrastructure Engineering*. – 2014. – Vol. 10. – Issue 5. – P. 589–603.

16. Peyras, L. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods—application to hazards studies [Text] / L. Peyras, C. Carvajal, H. Felix [and others] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2012. – Vol. 16. – Issue 7. – P. 795–817.

17. Calamak, M. Probabilistic assessment of slope stability for earth-fill dams having random soil parameters [Text] / M. Calamak, A.M. Yanmaz // *11th National Conference on Hydraulics in Civil Engineering & 5th International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes*. – Engineers Australia: 2014. – P. 34.

18. Вайнберг, А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений [Текст] / А. И. Вайнберг. – Харьков : Тяжпромавтоматика, 2008. – 304 с.

19. Романчук, К. Г. Сценарний підхід та метод Байєса для оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах [Текст] / К. Г. Романчук, Д. В. Стефанишин // *Системні дослідження та інформаційні технології*. – 2016. – № 2. – С. 116–123.

20. Мозговий, А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. – Харків : ХДТУБА, 2011. – Вип. 65. – С. 364–370.

21. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 161. – С. 90–101.

22. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 99–109.

23. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності греблі із ґрунтових матеріалів гідровузла ГЕС Тхакмо у В'єтнамі за критерієм переливу води через гребінь греблі [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 122–127.

24. Мозговий, А. О. Комплексна ймовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на прикладі бетонної греблі Дніпровської ГЕС [Текст] / А. О. Мозговий, О. Балабай // *Східно-Європейський науковий журнал*. – 2017. – Т. 1 (17), Ч. 1. – С. 117–126.

25. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 167. – С. 102–114.

26. Мозговий, А. О. Метод розв'язку задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи [Текст] /

А. О. Мозговий // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – Вип. 66. – С. 162–168.

27. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 174. – С. 70–80.

28. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // Науковий вісник будівництва. – Харків : ХДТУБА, 2010. – Вип. 58. – С. 264–270.

29. Idriss, I. M. Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice [Text] / I. M. Idriss // Proc. Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. – San Fransisco, 1985. – Vol. 1. – P. 255–320.

30. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] : ДБН В.1.1–12:2014. – [Чинний від 2014–10–01]. – К. : Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2014. – 110 с. – (Державні будівельні норми України).

31. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений [Текст] : пособие к разд. 5: Гидротехнические сооружения СНиП II–7–81. П 17–85. – Л. : Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1986. – 310 с.

32. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – 5-е изд., стереот. – М. : Высшая школа, 1998. – 576 с.

Мозговий Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Мозговой Андрей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнического строительства Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Mozgovuy Andrii Oleksiiovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Hydraulic Engineering, Kharkivskiyi natsionalnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury. Tel.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Статтю прийнято 27.11.2018 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 181

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. № 1328 (додаток 8)).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Новікова М. А.

Редактори Ібрагімова Н. В., Третякова К. А.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 27.11.2018 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн.друк. арк. 7,25. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейсрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.