



ISSN 2307-4221

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТА
ELECTRIFICATION OF TRANSPORT

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 8 / 2014

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ



8 / 2014

Індекс 68641

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

ISSN 2307-4221 (print)
ISSN 2312-6574 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

№ 8 / 2014

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Передплатний індекс 68641

URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ
ТРАНСПОРТУ**

науковий журнал

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ
ТРАНСПОРТА**

научный журнал

**ELECTRIFICATION
OF TRANSPORT**

scientific journal

№ 8, 2014

Видання Дніпропетровського національного університету
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 793 від 04.07.2014 р.
включений до Переліку наукових фахових видань України

Затверджений до друку Вченою радою університету
протокол № 5 від 24.11.2014 р.

Голова редакційної ради університету д.т.н., професор О. М. Пшінько

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**

Сиченко В. Г. д.т.н., с.н.с., ДНУЗТ, Україна

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

Кузнецов В. Г. д.т.н., професор, ДНУЗТ, Україна

**ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ
ВІД УКРАЇНИ**

Андрієнко П. Д. (Запорізький національний технічний університет);
Гетьман Г. К. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Денисюк С. П. (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»); Танкевич Є. М. (Інститут електродинаміки Національної академії наук України); Лежнюк П. Д. (Вінницький національний технічний університет); Костін М. О. (Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна); Панасенко М. В. (Державний науково-дослідний центр Укрзалізниці); Саєнко Ю. Л. (Приазовський державний технічний університет); Сокол Є. І. (Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»); Максимчук В. Ф. (Головне управління електрифікації та електропостачання Укрзалізниці)

ІНОЗЕМНІ ЧЛЕНИ

Бадьор М. П. (Московський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Бочков К. А. (Білоруський державний університет транспорту, Білорусь); Жарков Ю. І. (Ростовський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Омарбеков А. К. (Науково-дослідний центр Казахстантеміржолі, Казахстан); Сідоров О. О. (Омський державний університет шляхів сполучення, Російська Федерація); Васяк І. (Лодзинська політехніка, Інститут електроенергетики, Республіка Польща); Стележецькі Р. (Гданьський морський університет, Республіка Польща); Палечек Й. (Остравський технічний університет, Чеська республіка).

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Босий Д. О. к.т.н., доцент, ДНУЗТ, Україна

Видання виходить 2 рази на рік з червня 2011 р.

Бялонь А., Фурман Ю., Казімерчак А., Ласковський М.	
Проблематика захисту тягової мережі постійного струму 3 кВ від перенапруги.....	8
Бялонь А., Фурман Ю., Казімерчак А., Ласковський М.	Białoń A., Furman J., Kazimierczak A., Laskowski M.
Проблематика защиты тяговой сети постоянного тока 3 кВ от перенапряжений	8
Босий Д. О.	Bosiy D. O.
Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності.....	15
Босый Д. А.	Bosiy D. O.
Методика расчета мгновенных схем системы тягового электроснабжения для потребления постоянной мощности	15
Данилов О. А.	Danylov O. A.
Спрощений метод розрахунку параметрів мікропроцесорного захисту по збільшенню струму ...	26
Данилов А. А.	Danylov O. A.
Упрощенный метод расчета параметров микропроцессорной защиты по приращению тока.....	26
Карюк Д. Г.	Karyuk D. G.
Статистика експлуатації високовольтних прохідних ізоляторів	30
Карюк Д. Г.	Karyuk D. G.
Статистика эксплуатации высоковольтных проходных изоляторов	30
Кім Є. Д.	Kim Y. D.
Методика оцінювання якості закалювання складчастих високовольтних лінійних ізоляторів...	34
Ким Е. Д.	Kim Y. D.
Методика оценки качества закалки стеклодеталей высоковольтных линейных изоляторов...	34
Кирилюк Т. І.	Kirilyuk T. I.
Моделювання коефіцієнту втрат електричної енергії в контактній мережі на основі методу Монте-Карло	40
Кирилюк Т. И.	Kirilyuk T. I.
Моделирование коэффициента потерь электрической энергии в контактной сети на основе метода Монте-Карло	40
Павелек Р., Саєнко Ю. Л.	Pavelek R., Sayenko Y. L.
Вплив тягових навантажень на системи електропостачання	49
Павелек Р., Саєнко Ю. Л.	Pavelek R., Sayenko Y. L.
Влияние тяговых нагрузок на системы электроснабжения.....	49
Шелонг А.	Szelag A.
Застосування моделей і технологій моделювання як методів для техніко-економічного обґрунтування та проектування систем тягового електропостачання	56
Шелонг А.	Szelag A.
Применение моделей и технологий моделирования как методов для технико-экономического обоснования и проектирования систем тягового электроснабжения	56

Арпуть С. В.	
Вибір раціональних параметрів тягового електрорухомого складу.....	66
Арпуть С. В.	Arpul S. V.
Выбор рациональных параметров тягового электроподвижного состава.....	66
Афанасов А. М.	
Регулювання небалансної електрорушійної сили взаємно навантажених тягових електромашин постійного та пульсуючого струму.....	73
Афанасов А. М.	Afanasov A. M.
Регулирование небалансной электродвижущей силы взаимно нагруженных тяговых электромашин постоянного и пульсирующего тока .	73
Балійчук О. Ю.	
Нагрівання і захист обмоток допоміжних машин електропоїздів змінного струму при короткочасних перевантаженнях.....	79
Балійчук А. Ю.	Baliichuk O. U.
Нагревание и защита обмоток вспомогательных машин электропоездов переменного тока при кратковременных перегрузках.....	79
Бондаренко Ю. С.	
Експериментальне дослідження впливу частоти модуляції тягового перетворювача електровозів постійного струму з асинхронним приводом на суміжні системи.....	86
Бондаренко Ю. С.	Bondarenko Y. S.
Экспериментальное исследование влияния частоты модуляции тягового преобразователя электровозов постоянного тока с асинхронным приводом на смежные системы .	86
Курган М. Б., Хмелевська Н. П., Байдак С. Ю.	
Ефективність впровадження нових типів електровозів.....	93
Курган Н. Б., Хмелевская Н. П., Байдак С. Ю.	Kurhan M. B., Khmelevska N. P., Baidak S. Y.
Эффективность внедрения новых типов электровозов.....	93
Хворост М. В., Сорока К. О., Шпіка М. В., Бесараб А. І.	
Розробка моделей електродвигунів тягового електроприводу транспортних засобів з урахуванням вихрових струмів.....	99
Хворост М. В., Сорока К. А., Шпіка Н. И., Бесараб А. И.	Khvorost M. V., Soroka K. O., Shpika N. V., Besarab A. I.
Разработка моделей электродвигателей тягового электропривода транспортных средств с учетом вихревых токов.....	99
енергозбереження / energy saving	
Кузнецов В. Г., Калашников К. О.	
Розробка наукових принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом регулювання транспортного потоку.....	104
Кузнецов В. Г., Калашников К. А.	Kuznetsov V. G., Kalashnikov K. O.
Разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем регулирования транспортного потока.....	104

Папахов О. Ю., Логвинова Н. О.	
Обґрунтування руху поїздів на напрямках за погодженими розкладами	110
Папахов А. Ю., Логвинова Н. А.	Parakhov O. Y., Logvinova N. O.
Обоснование движения поездов на направлениях по согласованным расписаниям. 110	Rationale trains on the direction on the agreed schedule
	110
автоматизація і діагностика / automation and diagnose	
Сиченко В. Г., Матусевич О. О., Кириченко А. О.	
Процесний інжиніринг удосконалення системи діагностування тягових підстанцій	118
Сыченко В. Г., Матусевич А. А.,	Sichenko V. G., Matusевич O. O.,
Кириченко А. А.	Kirichenko A. O.
Процесный инжиниринг усовершенствования системы диагностики тяговых подстанций	Process engineering of the improving the diagnostic system of the traction substations .118
	118

UDC 621.331.3

A. BIAŁOŃ, J. FURMAN, A. KAZIMIERCZAK, M. LASKOWSKI (INSTYTUT KOLEJNICTWA, POLSKA)

Institute of railways, 04-275 Warsaw, Poland, 50 Chlopitskogo Street, tel.: +48224731453, fax: +48224731036, e-mail: abialon@ikolej.pl

PROBLEMATYKA OCHRONA SIECI TRAKCYJNEJ 3 KV PRĄDU STAŁEGO PRZED PRZEPIĘCIAMI

Wprowadzenie

Kolejowa sieć trakcyjna narażona jest na działanie przepięć pochodzenia zewnętrznego (wyładowania atmosferyczne) i wewnętrznego (przebiecia komutacyjne). Na dzień dzisiejszy urządzeniem, które chroni sieć trakcyjna przed przepięciami jest odgromnik różkowy, instalowany na konstrukcjach wsporczych sieci trakcyjnej. Ze względu na wysoki próg zadziałania odgromnik różkowy nie jest w stanie ograniczyć amplitud wszystkich przepięć, jakie mogą występować w sieci trakcyjnej, dotyczy to przede wszystkim przepięć komutacyjnych. W warunkach eksploatacyjnych próg zadziałania odgromnika różkowego mieści się w granicach 20-30 kV. Tak wysoki próg zadziałania odgromnika różkowego nie jest w stanie zapewnić odpowiedniego poziomu ochrony dla nowoczesnych urządzeń elektronicznych stosowanych na kolei. W związku z powyższym powstała koncepcja zastosowania warystorowych ograniczników przepięć do ochrony sieci trakcyjnej, które zapewniają bardziej stabilny i niższy poziom ochrony.

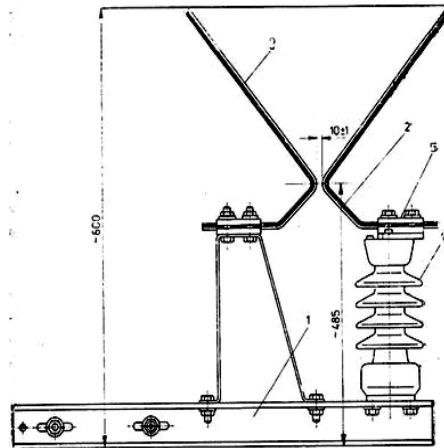
Charakterystyka stanu obecnego

Wspomniane na wstępie odgromniki różkowe (rys.1) instalowane są wzdłuż sieci jezdnej w odstępach wynoszących około 1200 m, natomiast w obszarach zwiększonej aktywności burzowej odległości są mniejsze i wynoszą około 600 m. Otwarte końce sieci jezdnej zabezpieczone są odgromnikami. Natomiast ze względu na zbyt wysoki poziom ograniczania przepięć przez odgromniki różkowe (około 20 kV), w podstacjach trakcyjnych, kabinach sekcyjnych i do ochrony kabli zasilaczy od strony sieci stosuje się przeważnie odgromniki zaworowe.

Odgromniki różkowe są instalowane na wierzchołkach konstrukcji wsporczych.

W przypadku przepięcia w sieci ulega przebicciu przerwa iskrownika odgromnika i pomiędzy różkiem połączonym z przewodem sieci jezdnej a różkiem uszynionym zapala się łuk elektryczny. Łuk ten po odprowadzeniu fali przepięciowej przewodzi prąd następczy pod wpływem napięcia roboczego. Natężenie tego prądu zależy od odległości miejsca

zainstalowania odgromnika od podstacji trakcyjnej. Prąd następczy zostaje przerywany w większości przypadków przez wyłącznik szybki, ponieważ jego wartość jest zwykle wyższa od natężenia prądu ich nastawienia. Powtórne samoczynne załączenie wyłączników nie napotyka na trudności, wskutek szybkiej dejonizacji przerwy iskrowej odgromnika. W szczególnych przypadkach, gdy prąd następczy jest niższy od prądu wyzwalaenia wyłącznika, jego przerwanie następuje samodzielnie przez oddziaływanie podmuchu elektromagnetycznego i termicznego, na łuk palący się na różkach.



Rys. 1. Odgromnik różkowy:
1 – podstawa; 2 – różek napięciowy; 3 – różek uszyniony; 4 – izolator; 5 – zacisk do połączenia z przewodami sieci jezdnej

Statyczne napięcie zapłonu odgromników różkowych wynosi 30 kV. Poziom tego napięcia jest wystarczający do ochrony izolacji głównej sieci trakcyjnej. Natomiast jest zbyt wysokie, aby mogły być chronione urządzenia zainstalowane w podstacjach trakcyjnych, kabinach sekcyjnych, w elektrycznych pojazdach trakcyjnych oraz zasilacze kablowe.

Dlatego też do ochrony tych urządzeń stosuje się odgromniki zaworowe. Zasadniczymi częściami odgromnika zaworowego jest iskiernik oraz połączony z nim szeregowo rezystor. Rezystor odgromnika składa się z kilku płytek, wykonanych z ziaren karbonitu spojonych lepiszczem. Rezystor zmienia swoją rezystancję w zależności od natężenia prądu. Zarówno iskiernik jak i rezystor są

umieszczone w szczelnej obudowie porcelanowej. Z chwilą pojawienia się w sieci przepięcia o wartości ($\geq 4,5$ kV) zagrażającej izolacji chronionych urządzeń, następuje zapłon na iskierniku i przez odgromnik zaczyna płynąć prąd do ziemi. W pierwszej chwili wartość prądu jest znaczna, a zatem rezystancja rezystora jest mała. W ten sposób utworzona zostaje droga, przez którą fala przepięciowa zostaje szybko odprowadzona do ziemi, a tym samym zostaje obniżona napięcie. Po spłynięciu ładunku fali przepięciowej przez odgromnik zaczyna płynąć prąd następczy. Natężenie prądu następczego jest znacznie mniejsze od natężenia prądu pioruna. W tym czasie rezystor odgromnika ma dużą rezystancję i ogranicza prąd następczy do wartości, przy której iskiernik może go przerwać. Dla ułatwienia przerywania prądu następczego, bieguny iskiernika są umieszczone nad biegunami magnesu trwałego. Pole magnetyczne, oddziałujące na łuk palący się pomiędzy biegunami iskiernika, powoduje jego wydmuchiwanie poza bieguny. W ten sposób wydłuża się droga palącego łuku, co ułatwia jego zgaszenie. W dnie podstawy odgromnika znajduje się membrana, której zadaniem jest niedopuszczenie do nadmiernego wzrostu ciśnienia w odgromniku w przypadku przeciążenia (zabezpieczenie przed wybuchem).

Ochrona przeciwprzepięciowa realizowana za pomocą wyżej wspomnianych urządzeń posiada następujące wady:

- wysoki poziom statycznego napięcia zapłonu iskierników, który jest uzależniony od stanu przerwy iskrowej co powoduje brak ograniczania większości zjawisk przepięciowych;
- duży rozrzut charakterystyki udarowej i jej zależność od warunków atmosferycznych;
- podczas zadziałania odgromnika różkowego następuje przepływ prądu następczego;
- pojawienie się prądu następczego wymusza zadziałanie wyłącznika szybkiego, co z kolei wymusza ingerencję personelu w celu ponownego załączenia napięcia zasilania.

W praktyce bardzo często może mieć miejsce także nieprawidłowa regulacja odstepu pomiędzy elektrodami wyładowczymi odgromnika różkowego, co ilustruje rys. 2. Fakt ten powoduje znaczące podwyższenie napięcia ograniczania, ponieważ zależność wielkości szczeliny wyładowczej od napięcia zadziałania nie ma charakteru liniowego.

Przedstawiony stan ochrony przeciwprzepięciowej sieci trakcyjnej i urządzeń z nią związanych nie zapewnia w pełni ochrony rozbudowanych urządzeń elektronicznych, które instalowane są na liniach kolejowych. Wobec tego koniecznością staje się zbudowanie nowoczesnego

systemu ochrony, opartego na elementach półprzewodnikowych. Aby ten system mógłby być zaprojektowany i wdrożony muszą zostać zrealizowane badania typu podstawowego, ponieważ aktualny stan wiedzy zawartej na ten temat w literaturze nie jest wystarczający.



Rys. 2. Nieprawidłowe rozstawienie elektrod wyładowczych w odgromniku różkowym

Ocena stanu istniejącego w świetle obowiązujących norm

Obecnie eksploatowany system ochrony przepięciowej sieci trakcyjnej w świetle obowiązujących norm w zasadzie spełnia ich zalecenia. Izolacja główna sieci trakcyjnej chroniona jest na poziomie 12 - 14 kV odgromnikiem różkowym. Izolacja kabli zasilaczy od strony sieci trakcyjnej chroniona jest odgromnikami zaworowymi ograniczającymi przepięcia do poziomu 4,5 kV. Pojazdy zasilane z sieci chronione są również ogranicznikami przepięć na poziomie 4,5 kV. Energia udarów piorunowych poprzez elementy ochrony odprowadzana jest do ziemi i sieci powrotnej prądu trakcyjnego, której głównym elementem jest tor. Zastosowanych tu elementów ochrony tylko odgromnik różkowy jest zdolny do przyjęcia maksymalnej amplitudy prądu wyładowania głównego, wynoszącej 200 kA (tabl. 1.).

Z torem połączone są często elementy urządzeń sterowania ruchem kolejowym (np. elementy obwodów torowych, czujniki koła, urządzenia do stwierdzania zagranych osi i płaskich miejsc). Urządzenia te chronione są od przepięć na poziomie 5 kV [1]. Skuteczność tych zabezpieczeń jest niewystarczająca, szczególnie w miejscach, gdzie w pobliżu instalacji elementów urządzeń srk do toru przyłączony jest odgromnik różkowy. Brak koordynacji ochrony w tym przypadku jest przyczyną uszkodzeń elementów urządzeń srk od udarów piorunowych do sieci trakcyjnej. Zastosowane zaworowe ograniczniki przepięć chroniące zasilacze podstacji ulegają również częstym awariom. Informacje te pochodzą z eksploatacji.

Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prąd piorunowy

Stopnie zagrożenia	Wartości podstawowych parametrów prądu piorunowego i efektywności ochrony							
	Poziomy ochrony	Efektywność ochrony	Wartość szczytowa [kA]	Stromość narastania [kV/ μ s]	Czas czoła [μ s]	Czas do półszczytu [μ s]	Całkowity ładunek [C]	Energia właściwa [KJ/ Ω]
Wyładowanie główne	I	98%	200	20	10	350	300	10000
	II	95%	150	15	10	350	225	5600
	III	90%	100	10	10	350	150	2500
	IV	80%	100	10	10	350	150	2500

Wymagania dla ochrony sieci trakcyjnej przed przebiegami

Kolejowa sieć trakcyjna jest siecią napowietrzną i jest narażona na bezpośrednie udary piorunowe. Elementy ochrony przepięciowej powinny spełniać wymagania pierwszego poziomu ochrony (tabl. 1). Ten poziom ochrony zapewniają eksploatowane dotychczas odgromniki rożkowe. Zastąpienie ich innymi ogranicznikami przepięć zapewniającymi efektywną ochronę wynoszącą również 98% (I poziom ochrony) wymagałoby zastąpienie ich równoważnymi ogranicznikami typu zaworowego. Wiąże się to z dużymi kosztami. Z danych zawartych w dostępnej literaturze wynika, że żaden z wymienionych ograniczników nie może być zastosowany bezpośrednio do ochrony sieci trakcyjnej dla zapewnienia pierwszego poziomu ochrony. Biorąc pod uwagę intensywność burzową a Polskę określaną mapami burzowymi z podanymi nich poziomami keraunicznymi (tzn. przeciętną liczbą dni burzowych w roku) proponuje się przyjąć III poziom ochrony. Zapewnia on efektywność ochrony wynoszącą minimum 90%. Dla tego poziomu efektywności ochrony przyjmuje się wartość szczytową prądu wyładowania doziemnego 100 kA. Ochrona ta powinna być skoordynowana z ochroną urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej jak i z ochroną urządzeń przyłączonych do sieci powrotnej.

Charakterystyka prądów piorunowych wyładowań doziemnych

Ocena zagrożenia piorunowego sieci trakcyjnej wymaga określenia następujących wartości charakteryzujących prąd piorunowy:

- wartości szczytowej prądu piorunowego,
- maksymalnej stromości narastania czoła impulsu prądu piorunowego,
- ładunku przeniesionego przez prąd piorunowy,
- energię prądu piorunowego wydzieloną na rezystancji 1 Ω .

Dodatkowo wykorzystywane są następujące parametry uzupełniające:

- czas trwania czoła prądu piorunowego,
- czas do półszczytu na grzbiecie prądu piorunowego,
- liczba udarów prądowych w wyładowaniu wielokrotnym.

Wartości wymienionych parametrów rozłożone są w sposób losowy. W tabl. 1 przedstawiono wartości dla pierwszej składowej wyładowania doziemnego.

Wymagania koordynacji ochrony sieci trakcyjnej przed przebiegami

Ochrona sieci trakcyjnej przed przebiegami powinna być skoordynowana z ochroną urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej i urządzeń przyłączonych do sieci powrotnej:

- parametry wielkości narażeń pochodzących od sieci trakcyjnej nie powinny przekraczać wytrzymałości na przebiegi urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej i przyłączonych do sieci powrotnej.
- lokalizacja elementów ochrony odgromowej nie powinna ujemnie oddziaływać na urządzenia srk.
- lokalizacja elementów ochrony przepięciowej od urządzeń srk powinna być udokumentowana wynikami badań w rzeczywistych warunkach terenowych.

Wymagania na elementy ochrony sieci trakcyjnej przed przebiegami

Do ochrony sieci trakcyjnej przed przebiegami zastępujące odgromniki rożkowe, należy stosować ograniczniki przepięć charakteryzujące się następującymi cechami:

- elementy ochrony powinny być przystosowane do montażu na konstrukcjach wsporczych sieci trakcyjnej.
- uszkodzenie elementu ochrony (układu elementów) nie powinno powodować trwałego zwarcia sieci do obwodu powrotnego.

- element ochrony powinien wytrzymać najwyższe trwałe napięcie zasilania sieci trakcyjnej 3900 V,

- element ochrony powinien wytrzymać prąd udarowy 100 kA dla impulsu 10/350 μ s,

- element ochrony powinien zredukować przepięcie do wartości ≥ 6000 V.

Propozycje ochrony sieci trakcyjnej przed przepięciami

System ochrony sieci trakcyjnej przed przepięciami ma wpływ na ochronę urządzeń zasilanych z sieci i przyłączonych do sieci powrotnej. Dlatego rozwiązanie tego zagadnienia musi być wielowariantowe, tak, aby można było dokonać wyboru rozwiązania zapewniającego optymalne warunki pracy dla urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej i dołączanych do obwodu powrotnego. Warianty proponowanych rozwiązań są scharakteryzowane poniżej kolejno.

Wariant pierwszy

W pierwszym rozwiązaniu proponuje się zachowanie stanu obecnego. W tym rozwiązaniu odgromnik rozkowy ograniczając amplitudę przepięć na poziomie 14 kV zapewnia ochronę izolacji sieci. Ochrona przeciwprzepięciowa urządzeń współpracujących z siecią trakcyjną i siecią powrotną musi być zainstalowana na wejściach i wyjściach tych urządzeń. Biorąc pod uwagę, że w ogranicznikach rozkowych poziom ograniczania zależy od stromości narastania impulsu przepięcia a także parametrów mechanicznych odgromnika (wielość szczeliny wynikająca z naprężeń i zanieczyszczeń), nie jest wiadomo jaki jest rzeczywisty poziom ograniczania przepięć przez odgromnik rozkowy. W tej sytuacji mogą być przeciążane ograniczniki w urządzeniach współpracujących z siecią trakcyjną i obwodem powrotnym. W obwodach torowych ograniczanie przepięć zaproponowane w pracy [1] wynosiło 5kV (przyjęto analogiczny poziom ochrony jak dla rozwiązań stosowanych w telekomunikacyjnych sieciach napowietrznych). Obecnie proponowana wartość podana w normie wynosi ok. 2kV (patrz PN-EN 50121-4). Biorąc pod uwagę doświadczenia z eksploatacji tych urządzeń, należy ocenić, że zabezpieczenia te nie są wystarczające. A zatem cały ciężar ochrony przed przepięciami będzie polegał na poprawieniu parametrów ochrony obwodów wejściowych i wyjściowych tych urządzeń. W przypadku rozległej infrastruktury urządzeń powiązanych z torem, koszty ochrony przeciwprzepięciowej byłyby bardzo wysokie. Dlatego ten sposób

rozwiązania problemu ochrony należy uznać za ekonomicznie nieuzasadniony. Z tego powodu należy zrezygnować z tego rozwiązania.

Wariant drugi

W drugim rozwiązaniu proponuje się zachowanie odgromników rozkowych oraz jednoczesne odsunięcie miejsc instalacji elementów ochrony przeciwprzepięciowej sieci trakcyjnej od elementów urządzeń obwodów torowych.

W literaturze nie napotkano na informacje jaka jest rzeczywista wartość tłumienia amplitud przepięć w funkcji odległości w przypadku sieci trakcyjnej i toków szynowych. W pracy [1] podano w formie informacji, że impedancja przejścia toki szynowe ziemia wzrasta wraz ze wzrostem stromości czoła narastania impulsu w sposób nieliniowy. Są to dane niewystarczające do oszacowania tłumienności toru dla przepięć odprowadzanych przez odgromnik rozkowy z sieci trakcyjnej do ziemi. Wiadomo, że tor dla propagacji przepięć należy traktować jako klasyczną niesymetryczną linię długą o parametrach rozłożonych. Propagacja amplitudy udaru będzie zależna od wielu różnych elementów powiązanych z torem (rozjazdy, obecność dławików torowych, połączeń międzytorowych i międzytokowych, oporność podtorza). Wariant ten jest stosunkowo tani pod warunkiem, że będą przeprowadzone pełne badania propagacji przepięć w sieci trakcyjnej i tokach szynowych dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych sieci trakcyjnej i urządzeń torowych. Należy przy tym również uwzględnić wpływ warunków środowiskowych. Przeprowadzenie badań umożliwi określenie przybliżonych odległości instalacji elementów ochrony odgromowej (odgromnik rozkowy) sieci trakcyjnej od elementów obwodów torowych i innych urządzeń. Jednak w wielu przypadkach może być zabiegiem niewystarczającym ponieważ przy zmianie lokalizacji można go zbliżyć do innych urządzeń wymagających ochrony przeciwprzepięciowej.

Wariant trzeci

Wariant trzeci polega na częściowej zamianie odgromników rozkowych na ograniczniki typu zaworowego lub warystorowego zainstalowane w pobliżu miejsc podłączenia elementów obwodów torowych i innych urządzeń z jednoczesną zmianą lokalizacji względem położenia pierwotnego. Zastosowanie ogranicznika typu zaworowego lub warystorowego w miejscu jego instalacji spowoduje zmniejszenie amplitudy przepięć i ich czasu trwania. Jednak odległość zainstalowania ogranicznika od elementów obwodów torowych i

innych urządzeń musi być analogicznie jak w poprzednim wariantcie poprzedzona badaniami propagacji przepięć. Wariant ten wydaje się być najbardziej korzystny do sprawdzenia w pierwszej kolejności w próbnej eksploatacji.

Wariant czwarty

Wariant czwarty polega na wymianie wszystkich odgromników rozkowych na ograniczniki typu zaworowego lub w ostateczności warystorowego. Zastosowanie ogranicznika typu zaworowego lub warystorowego w miejscu jego instalacji spowoduje zmniejszenie amplitudy przepięć i ich czasu trwania. Jednak odległość zainstalowania ogranicznika od elementów obwodów torowych i innych urządzeń musi być analogicznie jak w poprzednim wariantcie poprzedzona badaniami propagacji przepięć. Wariant ten może być docelowym dopiero po sprawdzeniu w próbnej eksploatacji wariantu trzeciego.

Wybór elementów ochrony przepięciowej do ochrony sieci trakcyjnej od przepięć

Ogólne kryteria wyboru nowych elementów ochrony

Wybór ogranicznika przepięć powinien uwzględniać nie tylko parametry elektryczne ale również miejsce jego instalacji i warunki pracy, ponieważ decyduje to o skuteczności ochrony i jego trwałości. Warunki pracy przewidziane dla ogranicznika przepięć powinny uwzględniać:

- temperaturę otoczenia;
- wysokość miejsca instalowania nad poziomem morza;
- stan zanieczyszczenia środowiska;
- przewidywana pozycja pracy, miejsce i sposób instalowania;
- przewidywane obciążenia mechaniczne.

Przy ochronie sieci trakcyjnej należy brać pod uwagę również informacje o:

- rodzaju urządzeń zasilanych z sieci trakcyjnej;
- sposobie włączenia urządzeń do sieci;
- długości odcinków kablowych;
- znajomości napięć probierczych izolacji chronionych urządzeń.

Biorąc pod uwagę powyższe kryteria doboru ogranicznika przepięć i wymagania na ochronę sieci trakcyjnej zastosowanie tylko samego iskiernikowego ogranicznika przepięć (np. odgromnik rozkowy) powoduje wystąpienie prądu następczego, który będzie miał w tym przypadku charakter prądu zwarciovego aż do chwili jego zgaszenia w wyniku zadziałania wyłącznika szybkiego. Aby wyeliminować możliwość występowania prądu następczego, należy zastosować szeregowo połączenie iskiernikowego

ogranicznika przepięć i beziskiernikowego ogranicznika przepięć z tlenków metali (ogranicznik warystorowy) lub tylko beziskiernikowy ogranicznik przepięć z tlenków metali, który będzie aktywny tylko w okresie występowania przepięcia (patrz PN-EN 50123-5). Zalecanym do eksploatacji ogranicznikiem przepięć powinien być w zasadzie ogranicznik składający się z szeregowo połączonych iskiernikowego ogranicznika przepięć i warystora.

Warystor wchodzący w skład ogranicznika przepięć jest bardziej wrażliwym elementem niż odgromnik iskiernikowy i może skutecznie spełniać stawiane mu zadania tylko wtedy, gdy zostaną właściwie dobrane jego parametry. Parametry warystora muszą spełniać szereg warunków. Najwyższe dopuszczalne udary prądowe, największa dopuszczalna energia i największa dopuszczalna średnia moc warystora muszą być wyższe od tych, na które może on być narażony. Napięcie trwałej pracy U_c powinno być wyższe od dopuszczalnych wahań napięcia zasilania sieci.

Zgodnie z danymi zawartymi w tablicy 1 należy się liczyć z najwyższą wartością prądu udaru piorunowego wynoszącą nawet 200kA (skrajnym przypadku). Wystąpienie takiego udaru do sieci trakcyjnej np. pomiędzy ogranicznikami, spowoduje rozływ prądu w dwóch kierunkach wzdłuż sieci trakcyjnej i do ograniczników dotrze po około 100 kA prądu udarowego. Jest to jednak prąd graniczny w wyniku którego może nastąpić zmiana wartości napięcia znamionowego i starzenie się struktury. Wartość tego napięcia może się zmieniać w górę lub w dół w stosunku do wartości katalogowej. W pierwszym przypadku ograniczanie amplitudy przepięć będzie następowało na wyższym poziomie w stosunku do wartości katalogowej. W drugim przypadku wartość napięcia może się zbliżać do wartości napięcia trwałej pracy co grozi zniszczeniem warystora. Z tego względu nie należy stosować warystora o mniejszym prądzie granicznym niż 100 kA. Jest to najczęściej podawana wartość granicznego prądu wyładowczego (4/10 μ s). Tego typu warystory są przystosowane do wielokrotnego przyjmowania prądów wyładowczych w zakresie od 2,5 do 20 kA.

Wybór napięcia trwałej pracy ogranicznika

Najważniejszym parametrem ogranicznika zaworowego jest napięcie jego trwałej pracy U_c . Przy wyborze wartości napięcia U_c należy spełnić następujące warunki:

1. Powinna być większa od wartości napięcia, która może długotrwale wystąpić na zaciskach ogranicznika.
2. Wartość napięcia U_c ogranicznika powinna być wyższa od spodziewanych amplitud przepięć wolnozmiennych w sieci trakcyjnej.

3. Ogranicznik powinien posiadać określoną zdolność pochłaniania energii wyrażonej w kJ. Jest to zdolność do zaabsorbowania określonej energii przy przepływie przez niego jednorazowego impulsu prądowego.

Wybór ogranicznika o zbyt niskim napięciu U_c związany jest z ryzykiem uszkodzenia z powodu naturalnego procesu degradacji (obniżanie lub wzrost wartości napięcia znamionowego). Degradacja objawiać się będzie stopniowo po kilku latach eksploatacji.

Jednocześnie zysk z tytułu uzyskania niższej ceny przy wyborze takiego ogranicznika jest i tak niewielki w stosunku do ponoszonego ryzyka.

Omówione wyżej uwagi dotyczące wyboru napięcia U_c ogranicznika przepięć ma jeszcze jeden ważny aspekt. W obwodach sieci trakcyjnej 3 kV należy się liczyć ze wzrostem napięcia do wartości 3900V DC i przepięcia wolnozmiennego o amplitudzie 5075V i czasie trwania 20ms (patrz Karta UIC 550). Z tego względu przy wyborze ogranicznika do ochrony przed przepięciami pochodzącymi od wyładowań atmosferycznych i procesów łączeniowych, należy wybierać ograniczniki przepięć wytrzymujące energię pochodzącą od uderów piorunowych. Uwzględniając powyższe zależności i uwarunkowania, proponujemy przy wyborze ogranicznika zwiększyć wartość napięcia U_c o 15 % powyżej amplitudy napięcia wolnozmiennego.

W związku z tym należy wybrać ogranicznik, którego trwałe napięcie trwałe U_c powinno wynosić 5850V. Jednak najbliższa zalecana wartość w normie wynosi 6000 V (patrz PN-EN 50123-5). Dlatego obniżenie poziomu ochrony poniżej tej wartości nie jest zalecane w obecnych warunkach. Chcąc ograniczyć amplitudę przepięć na poziomie 4.5 kV należałoby zastosować ogranicznik przepięć, który powinien pochłonąć energię około 253 kJ co jest praktycznie trudne do osiągnięcia ($5075 \text{ kV} \times 2,5 \text{ kA} \times 20 \text{ ms} = 253750 \text{ J}$).

Przepięcia spowodowane procesami łączeniowymi w obwodzie sieci trakcyjnej, której impedancja ma charakter indukcyjny mogą osiągać wartości rzędu 10 – 20 kV. Prąd przepływający przez warystor podczas ograniczania przepięcia nie przekroczy wartości prądu płynącego w sieci trakcyjnej przed wystąpieniem tych zjawisk dla tak wybranego ogranicznika (nie przekroczy prądu płynącego przezeń w czasie wyładowania piorunowego).

Wybór ogranicznika

W katalogach firm produkujących ograniczniki przepięć dla zakresu średnich napięć wyszczególnione są elementy mające zastosowanie do ochrony sieci

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

prądu przemiennego. Jak przedstawiono wcześniej podstawowym parametrem jest napięcie trwałej pracy ogranicznika U_c , które dotyczy wartości skutecznej napięcia przemiennego. Wartość napięcia pracy takiego ogranicznika zainstalowanego w sieci prądu stałego nie jest równoważna wartości skutecznej ani wartości szczytowej dla prądu przemiennego, która podawana jest w katalogu dla danego typu ogranicznika. Od wartości napięcia trwałej pracy ogranicznika warystorowego zależy wartość napięcia znamionowego, która decyduje o początku aktywnej pracy.

W warunkach kolejowych ogranicznik, w którego skład wchodzi warystor musi pracować przy dużych zmianach napięcia sieci trakcyjnej (graniczne wartości od 2000 – 3900 V oraz w obecności wolnozmiennych przepięć 5075V/20 ms). Wymaga to przeprowadzenia badań laboratoryjnych dla wybranego z katalogu ogranicznika warystorowego w celu sprawdzenia jego przydatności do pracy w sieci trakcyjnej.

Z przeprowadzonych analiz wynika, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest wyszukanie wśród producentów krajowych (BEZPOL, ABB Przasnysz, PELELECTRIC, APATOR Bydgoszcz) firmy która podjęła by się zmodyfikowania parametrów jednego ze swoich wyrobów, aby można było go zastosować do ograniczania przepięć w sieci trakcyjnej prądu stałego 3000 V.

REFERENCES

1. Ochrona przeciwprzepięciowa i przeciwporażeniowa w urządzeniach srk z elementami elektronicznymi, Praca CNTK nr 1002/24, 1994r.
2. Budowa i poligonowe badania prototypowego systemu ochrony przed przepięciami z ogranicznikami warystorowymi. IK 2011.
3. Budowa i poligonowe badania prototypowego systemu ochrony przed przepięciami z ogranicznikami warystorowymi. Część 2. Badania laboratoryjne. IK 2011.
4. Warystory tlenkowe, Wojciech Pytel, PEELECTRIC, publikacja na prawach rękopisu.
5. Źródła i charakterystyka zagrożeń przepięciowych, Zdobysław Flisowski, Materiały szkoleniowe f-my INEXIM, 1996.
6. Zakłócenia w urządzeniach elektronicznych, Alain Charoy, Zasady i porady instalacyjne, WNT, Warszawa, 2000.
7. Анохов І. В. Про електромагнітну сумісність електрифікованих залізничних ліній постійного струму / І. В. Анохов, М. П. Бадьор, В. І. Гаврилюк, В. Г. Сиченко // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 2. – С. 10-12.
8. Сиченко В. Г. Підтвердження відповідності контактної мережі: проблеми та досвід // Залізничний транспорт України. – 2004. – №4. – С. 36-38.

Received 10.07.2014.

External reviewer *Lezhnuk P. D.*

Kolejowa sieć trakcyjna narażona jest na działanie przepięć pochodzenia zewnętrznego (wyładowania atmosferyczne) i wewnętrznego (przebiecia komutacyjne). Na dzień dzisiejszy urządzeniem, które chroni sieć trakcyjna przed przepięciami jest odgromnik różkowy, instalowany na konstrukcjach wsporczych sieci trakcyjnej. Ze względu na wysoki próg zadziałania odgromnik różkowy nie jest w stanie ograniczyć amplitud wszystkich przepięć, jakie mogą występować w sieci trakcyjnej, dotyczy to przede wszystkim przepięć komutacyjnych. Przedstawiony stan ochrony przeciwprzebieciowej sieci trakcyjnej i urządzeń z nią związanych nie zapewnia w pełni ochrony rozbudowanych urządzeń elektronicznych, które instalowane są na liniach kolejowych. Wobec tego koniecznością staje się zbudowanie nowoczesnego systemu ochrony, opartego na elementach półprzewodnikowych. Aby ten system mógłby być zaprojektowany i wdrożony muszą zostać zrealizowane badania typu podstawowego, ponieważ aktualny stan wiedzy zawartej na ten temat w literaturze nie jest wystarczający. Autorzy referatu oferują kilka rozwiązań technicznych w zakresie ochrony sieci trakcyjnej przed przepięciami. Pokazano, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest wyszukanie wśród producentów krajowych firmy która podjęła by się zmodyfikowania parametrów jednego ze swoich wyrobów.

Słowa kluczowe: Układ napędowy, prądu stałego, uderzenie pioruna, przełączania zabezpieczenie, przeciwprzebieciowe.

УДК 621.331.3

A. БЯЛОНЬ, Ю. ФУРМАН, А. КАЗИМЕРЧАК, М. ЛАСКОВСКИЙ (ИНСТИТУТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ, ПОЛЬЩА)

Институт залізничного транспорту, 04-275 Варшава, Польша, вул. Хлопичького 50, тел.: +48 22 4731453, факс: +48 22 4731036, ел. пошта: abialon@ikolej.pl

ПРОБЛЕМАТИКА ЗАХИСТУ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ 3 КВ ВІД ПЕРЕНАПРУГИ

Тягова мережа піддається впливам зовнішнього (блискавки) і внутрішнього походжень (комутаційних перенапруг). В даний час тим пристроєм, який захищає мережу від перенапруг є роговий розрядник, який встановлюється на несучі конструкції контактних мереж. Через високі значення напруги спрацьовування розрядник не в змозі зменшити амплітуду всіх перенапруг, які можуть існувати в контактній мережі, це стосується в основному комутаційних перенапруг. Представлено стан захисту контактної мережі від перенапруги. Показано, що розрядники не забезпечують повний захист складних електронних пристроїв, встановлених на залізничних лініях. Таким чином, назріла необхідність створення сучасної системи захисту, заснованої на напівпровідникових пристроях. Для того, щоб ця система була розроблена і впроваджена, необхідні додаткові дослідження, тому що сучасний рівень знань, наявний в літературних джерелах є недостатнім. Автори статті пропонують кілька технічних рішень для захисту контактної мережі від перенапруг. Показано, що кращим рішенням є пошук серед вітчизняних виробників такої компанії, яка могла б модифікувати параметри одного зі своїх продуктів.

Ключові слова: тягова мережа, постійний струм, блискавка, комутаційні перенапруги, захист.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

УДК 621.331.3

A. БЯЛОНЬ, Ю. ФУРМАН, А. КАЗИМЕРЧАК, М. ЛАСКОВСКИЙ (ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА, ПОЛЬЩА)

Институт железнодорожного транспорта, 04-275 Варшава, Польша, ул. Хлопичького 50, тел.: +48 22 4731453, факс: +48 22 4731036, эл. почта: abialon@ikolej.pl

ПРОБЛЕМАТИКА ЗАЩИТЫ ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА 3 КВ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Тяговая сеть подвергается воздействиям внешнего (молнии) и внутреннего происхождений (коммутационных перенапряжений). В настоящее время тем устройством, которое защищает сеть от перенапряжений, является роговой разрядник, который устанавливается на несущие конструкции контактных сетей. Из-за высокого значения напряжения срабатывания разрядник не в состоянии уменьшить амплитуду всех перенапряжений, которые могут существовать в контактной сети, это касается в основном коммутационных перенапряжений. Представлено состояние защиты контактной сети от перенапряжения. Показано, что разрядники не обеспечивают полную защиту сложных электронных устройств, установленных на железнодорожных линиях. Таким образом, назрела необходимость создания современной системы защиты, основанной на полупроводниковых устройствах. Для того, чтобы эта система была разработана и внедрена, необходимы дополнительные исследования, потому что современный уровень знаний, имеющийся в литературных источниках является недостаточным. Авторы статьи предлагает несколько технических решений для защиты контактной сети от перенапряжений. Показано, что лучшим решением является поиск среди отечественных производителей такой компании, которая могла бы модифицировать параметры одного из своих продуктов.

Ключевые слова: тяговая сеть, постоянный ток, молния, коммутационные перенапряжения, защита.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

УДК 621.331.3

Д. О. БОСИЙ (ДНУЗТ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: dake@i.ua

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ МИТТЄВИХ СХЕМ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ СПОЖИВАННЯ ПОСТІЙНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Вступ

Нестационарний характер електричних навантажень, який створюється електрорухомим складом в системі електропостачання, та їх здатність переміщуватись у просторі відносно тягових підстанцій призводять до залежності напруги і споживання струму від характеру руху поїздів та особливостей електрифікованої ділянки. Напруга безпосередньо на струмоприймачах електровозів коливається в досить широких межах, що примушує враховувати зміни режиму напруги через дві основні причини.

По-перше, швидкість електровозів з тяговими двигунами послідовного збудження при фіксованій силі тяги і позиції регулювання змінюється практично пропорційно, що в результаті впливає на виконання графіку руху поїздів.

По-друге, розрахунок режимів системи тягового електропостачання, який базується на даних тягових розрахунків, вимагає тісного ув'язування процесів розподілу та споживання електричної енергії.

Взаємодія електрорухомого складу з системою тягового електропостачання є досить складним процесом, який проявляється в тому, що змінюється як координата, так і швидкість руху поїзда. В свою чергу, струми залежать від швидкості руху і отриману таким чином миттєву схему можна розрахувати, але застосувати результати розрахунку до процесу руху поїзда не можна через неможливість зарані передбачити зміни швидкості, координати та профілю, що входять до цієї ж системи диференціальних рівнянь руху поїздів.

Складність та важливість описаної задачі підтверджується великою кількістю методів, які створені у різні часи для її вирішення [1]. Умовно розроблені методи розділяються на три групи.

Перша група методів (автори М. М. Костромітін, О. Б. Лебедев, Л. Г. Абелішвілі, Г. Г. Марквардт) розрахована на визначення не миттєвих, а усереднених величин.

У другій групі методів (автори В. А. Тимофеев, Б. Кузнецов) необхідне уточнення досяга-

ється послідовними наближеннями, перше з яких виконується з врахуванням тільки спаду напруги до розрахункового поїзду, або цього ж спаду, помноженого на коефіцієнт, який наближено враховує вплив супутніх поїздів.

Третя група методів ґрунтується на ідеї одночасного розрахунку всіх навантажень (автори В. А. Кісляков, Б. А. Бесков).

З розвитком електронно-обчислювальної техніки подальшого поширення здобули метод послідовних наближень (розроблений М. Я. Пузановим) та метод одночасного моделювання (впроваджений М. Б. Улановським).

У методі послідовних наближень ув'язування неперервних змін напруги, швидкості і сили тяги одного електровозу та врахування взаємного впливу струмів інших поїздів відбувається повторними перерахунками. Для зменшення їх кількості використані деякі методи прискорення збіжності.

У методі одночасного розрахунку зміна координат, швидкостей і струмів усіх електровозів враховується одразу, для чого питомі прискорюючі та гальмівні сили уведені до формул рішення рівнянь руху разом зі своїми похідними. Останні отримуються диференціюванням для випадку неперервної зміни змінних і прогнозуванням на середину наступного кроку.

Обидва методи принципово придатні для будь-якого роду струму, але історично так склалось, що метод послідовних наближень застосовувався для постійного, а метод одночасного розрахунку – для змінного струму.

У всіх розглянутих методах тягове навантаження прийнято замінювати джерелом ідеального струму. Таке припущення спрощує електричні розрахунки миттєвих схем, оскільки задача зводиться до розрахунку струморозподілу за заданими величинами струмів та наступні розрахунки напруги на підставі заданої е.р.с. на шинах тягових підстанцій. На підставі такого підходу досить просто розраховуються відомі класичні залежності зміни струмів фідерів та

напруги на струмоприймачі електровозу для різних схем живлення [2].

Врахування взаємозв'язку напруги на струмоприймачі електровозу і характеристик електрорухомого складу актуальне для випадків, коли система управління самого електрорухомого складу не передбачає стабілізації тягової потужності [3, 4]. Це стосується усього електрорухомого складу постійного і однофазно-постійного струму з колекторними тяговими двигунами, що експлуатуються на залізницях України.

Розвиток сучасної елементної бази дозволяє побудувати потужні одиниці електрорухомого складу, система управління яких дозволяє стабілізувати значення тягової потужності. В такому випадку зміна режиму напруги на струмоприймачі за інших рівних умов руху призведе лише до зміни складових первинного струму електровозу, що в свою чергу, вплине на витрати електроенергії, ККД та коефіцієнт потужності електрорухомого складу без впливу на тягово-енергетичні характеристики [4].

У підтвердження тому виступають і сучасні дослідження з розробки керованого електропостачання на електрифікованих залізницях постійного струму [5]. В них, зокрема вказується, що збільшення середньої напруги на струмоприймачі електровозу на 20 % призводить до зниження середнього струму електровозу на 9-17 %, і зниження втрат електроенергії в тяговій мережі на 2 % у відношенні до витрат електричної енергії тяговими двигунами.

На підставі вищевикладеного зрозуміло, що розрахунки систем тягового електропостачання, які виконувались з припущенням того, що реалізована електрорухомим складом потужність визначається лише значенням струму при номінальній нарузі, підлягають уточненню. Крім цього, експлуатація одночасно і сучасного і наявного електрорухомого складу призводить до погіршення умов роботи останнього в частині впливу режиму напруги на тягово-енергетичні характеристики.

Постановка задачі

Метою даної роботи є розробка методики розрахунку миттєвих схем, яка дозволить виконувати електричні розрахунки системи тягового електропостачання на підставі вихідної потужності електрорухомого складу, враховуючи можливість її постійного споживання при переміщенні тягового навантаження у просторі.

Для досягнення поставленої мети дослідимо закономірності зміни параметрів електроенергетичних процесів для відомих схем живлення контактної мережі взявши за основу баланс потуж-

ностей для кожної миттєвої схеми. З огляду на простоту розрахунків консольної схеми живлення та її неспроможність забезпечити номінальний режим напруги при збільшених навантаженнях, теоретичні викладки для неї не приводяться.

Основна частина

Розглянемо баланс потужностей для двосторонньої схеми постійного струму за умови прослідкування одного електрорухомого навантаження з постійною споживаною потужністю P (рис. 1). Для спрощення подальших викладок поточну координату розташування навантаження $x(t)$ позначатимемо як x , пам'ятаючи про її залежність від часу t .

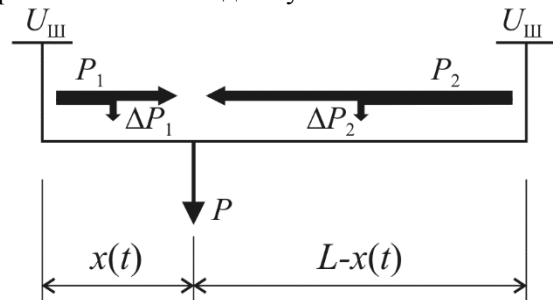


Рис. 1. Розрахункова схема для двосторонньої схеми живлення

Напругу на шинах тягових підстанцій вважатимемо постійною і рівною для двох суміжних підстанцій. Тоді для будь-якого моменту часу для заданих умов, справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_2 - \Delta P_2, \quad (1)$$

де P_1, P_2 – потужності, які віддаються першою та другою підстанціями;

$\Delta P_1, \Delta P_2$ – втрати потужності в тяговій мережі, які виникають при передачі основної потужності P .

Нехай в деякий момент часу струм електровозу матиме значення I , а напруга на струмоприймачі – U , тобто споживана електровозом потужність $P = U \cdot I$. Інші складові балансу потужностей для цього моменту часу матимуть вигляд

$$P = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2 + U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - x) \cdot I_2^2, \quad (2)$$

де I_1, I_2 – струми фідерів відповідно першої та другої підстанції;

$U_{\text{ш}}$ – напруга на шинах тягової підстанції;

r_0 – питомий опір тягової мережі;

x – поточна координата розташування навантаження;

L – довжина міжпідстанційної зони.

Використовуючи відомі формули струморозподілу для двосторонньої схеми, отримуємо

$$P = U_{\text{ш}} I \frac{L-x}{L} - r_0 \cdot x \cdot I^2 \frac{(L-x)^2}{L^2} + U_{\text{ш}} I \frac{x}{L} - r_0 \cdot (L-x) \cdot I^2 \frac{x^2}{L^2}. \quad (3)$$

Спростуючи рівняння та групуємо величини відносно невідомої I , отримаємо рівняння

$$P = U_{\text{ш}} I - r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right) I^2. \quad (4)$$

Таким чином, з останнього виразу видно, що споживана електровозом потужність має дві складові: перша з них визначається добутком струму та номінальної напруги (у випадку розташування поблизу шин тягової підстанції), а друга визначає втрати потужності при її передачі від шин тягової підстанції до будь-якої точки тягової мережі. В загальному випадку можна стверджувати, що при необхідності споживання заданої потужності в довільній точці тягової мережі струм електровоза буде збільшуватись на величину, що визначає необхідні для передачі цієї потужності втрати, відносно струму, визначеного для номінальної напруги.

Для більшої зручності подальших викладок введемо поняття функції опору

$$f(x) = r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (5)$$

яка фізично визначає закономірність зміни опору для даної схеми живлення.

Переписавши рівняння (4) з врахуванням (5) та вирішивши його відносно струму, відкидаючи корінь рівняння, який не має фізичного сенсу, матимемо

$$P = U_{\text{ш}} I - f(x) I^2, \quad (6)$$

$$I = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P}}{2f(x)}. \quad (7)$$

Фактично, чисельник виразу (7) визначає падіння напруги, яке створюється при споживанні заданої потужності в будь-якій точці тягової мережі. У порівнянні з традиційним методом роз-

рахунку, де потужність задається струмом для номінальної напруги, на практиці можуть мати місце суттєві відмінності тягових струмів в залежності від фактичних значень напруги.

Проаналізуємо, як зміняться електричні розрахунки для даної схеми живлення при прослідкуванні одного поїзду, який в одному випадку задається постійним струмом для номінальної напруги, а в другому – постійною потужністю. Розрахунки проведемо для типової ділянки постійного струму довжиною 20 км, з питомим опором тягової мережі 0,05 Ом/км та середньою швидкістю руху 60 км/год. Напругу на шинах обох тягових підстанцій вважатимемо рівною 3,3 кВ а внутрішніми опорами підстанцій знехтуємо.

В результаті розрахунків отримаємо наступні сімейства кривих струмів парних (рис. 2, а) та непарних фідерів (рис. 2, б) відносно трьох значень потужностей, а саме 3.3 МВт, 6.0 МВт і 8.0 МВт відповідно. Аналогічно розрахункам струмів фідерів, виконані розрахунки напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 3) для вказаних потужностей.

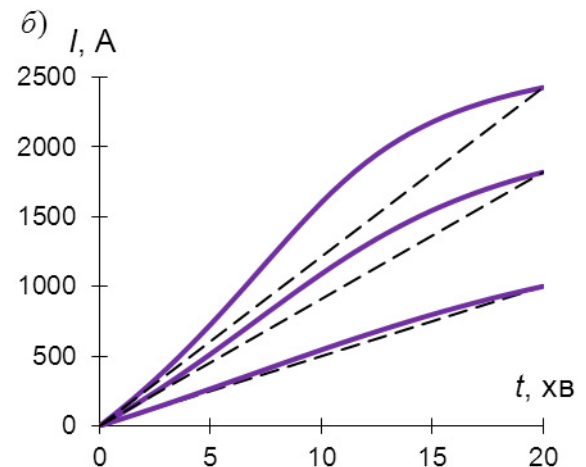
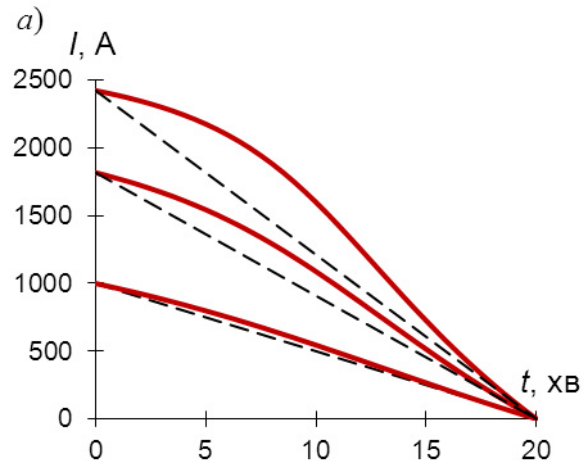


Рис. 2. Сімейства струмів фідерів двосторонньої схеми живлення за двома методами розрахунку

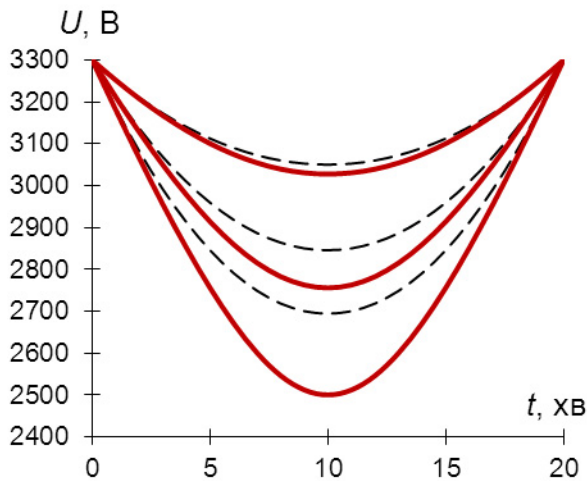


Рис. 3. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для двосторонньої схеми, визначені різними методами

Як видно з аналізу приведених залежностей, максимальні відмінності розрахункових величин спостерігаються всередині міжпідстанційної зони, при чому зі збільшенням потужності їх відносні значення збільшуються.

Для вузлової схеми живлення з виконанням поставлених умов структура балансу потужностей дещо ускладниться. Через можливість дзеркального відтворення, при узагальненні достатньо розглянути розташування навантаження на будь-якій колії між підстанцією та постом секціонування (рис. 4).

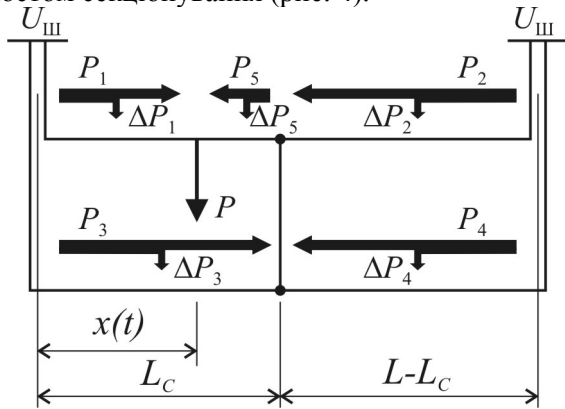


Рис. 4. Розрахункова схема для вузлової схеми живлення

Отже, для будь-якого моменту часу, справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_5 - \Delta P_5, \quad (8)$$

де, в свою чергу,

$$P_5 = P_2 - \Delta P_2 + P_3 - \Delta P_3 + P_4 - \Delta P_4. \quad (9)$$

Приймаючи споживану електровозом потужність $P = U \cdot I$, визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2;$$

$$P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_C \cdot I_3^2;$$

$$P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot (I_2 + I_3 + I_4)^2,$$

де I_1, I_2, I_3, I_4 – струми фідерів відповідно першої (1, 3) та другої (2, 4) підстанції.

Використовуючи формули розподілу струмів для вузлової схеми живлення, матимемо

$$P_1 - \Delta P_1 = U_{\text{ш}} I \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} \cdot x \right) - r_0 \cdot x \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} \cdot x \right)^2;$$

$$P_2 - \Delta P_2 = U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$P_3 - \Delta P_3 = U_{\text{ш}} I \left(\frac{L - L_C}{2LL_C} \cdot x \right) - r_0 \cdot L_C \cdot I^2 \left(\frac{L - L_C}{2LL_C} \cdot x \right)^2;$$

$$P_4 - \Delta P_4 = U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2;$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2.$$

Користуючись (9), визначимо по-черзі складові рівняння (8), а саме

$$P_1 + P_5 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = U_{\text{ш}} I \times \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} x + \frac{x}{2L} + \frac{L - L_C}{2LL_C} x + \frac{x}{2L} \right) = U_{\text{ш}} I;$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_5 = r_0 I^2 \times \left[x \left(1 - \frac{L + L_C}{2LL_C} x \right)^2 + (L - L_C) \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + \right]$$

$$+L_C \left(\frac{L-L_C}{2LL_C} x \right)^2 + (L-L_C) \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + (L_C-x) \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_C} \right)^2 \Bigg].$$

Спростуючи вираз у дужках, отримаємо

$$\Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \left[x - \left(\frac{L+L_C}{2LL_C} \right) x^2 \right].$$

Таким чином, повертаючись до рівняння (8), матимемо

$$P = U_{ш} I - r_0 I^2 \left[x - \left(\frac{L+L_C}{2LL_C} \right) x^2 \right].$$

Виконавши заміну виразу у дужках на функцію опору $f(x)$, матимемо отримане раніше рівняння (6) та аналогічний виразу (7) розв'язок.

У випадку знаходження поїзду за постом секціонування, зміниться структура функції опору $f(x)$ тягової мережі таким чином, що в загальному вигляді будемо мати

$$f(x) = r_0 \times \begin{cases} x - \left(\frac{L+L_C}{2LL_C} \right) x^2, & 0 \leq x \leq L_C; \\ \frac{L \left(x - \frac{L_C}{2} \right) \left(L - \frac{L_C}{2} \right) x^2}{L-L_C - \frac{L(L-L_C)}{L_C}}, & L_C \leq x \leq L. \end{cases}$$

За результатами розрахунків для вузлової схеми живлення і прийнятих на початку потужностей, можна отримати наступні сімейства струмів парних (рис. 5, а) та непарних фідерів (рис. 5, б). Аналогічним чином отримані залежності напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 6) для вказаних потужностей.

Як видно з приведених залежностей, для вузлової схеми живлення максимальні відмінності розрахункових величин спостерігаються не в середині міжпідстанційної зони, а зміщені на 1/3 відносно координати поста секціонування.

Паралельна схема живлення матиме ще більше ускладнену структуру розподілу потужностей. Для досягнення поставленого завдання необхідно розглянути два випадки розташування навантаження відносно пунктів паралельного з'єднання контактних підвісок та поста секціонування. Знову ж таки, дивлячись на поздовжню симетричність та можливість дзеркаль-

ного відтворення схеми, достатньо розглянути випадки знаходження навантаження до першого пункту та між першим пунктом і постом секціонування (рис. 7).

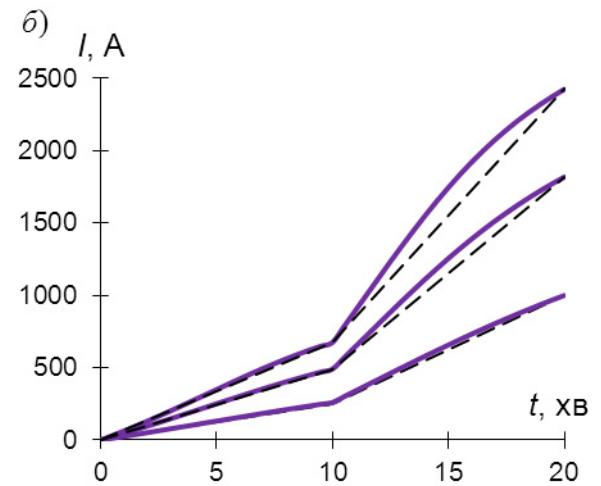
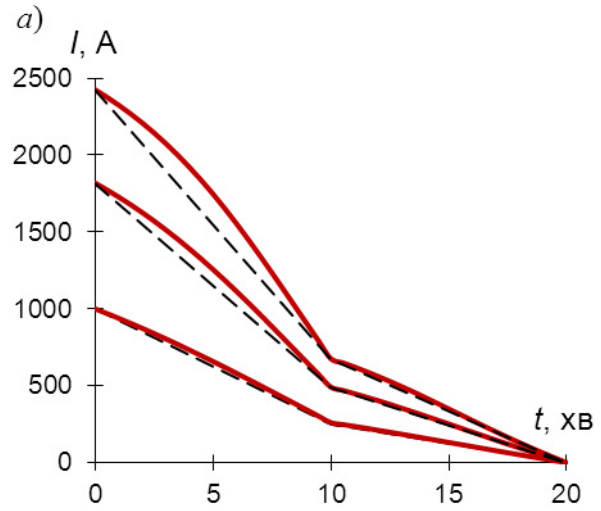


Рис. 5. Сімейства струмів попутних фідерів вузлової схеми живлення за двома методами розрахунку

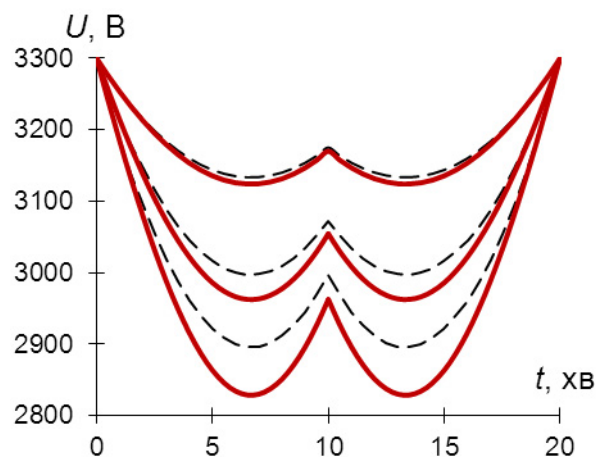


Рис. 6. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для вузлової схеми, визначені двома методами

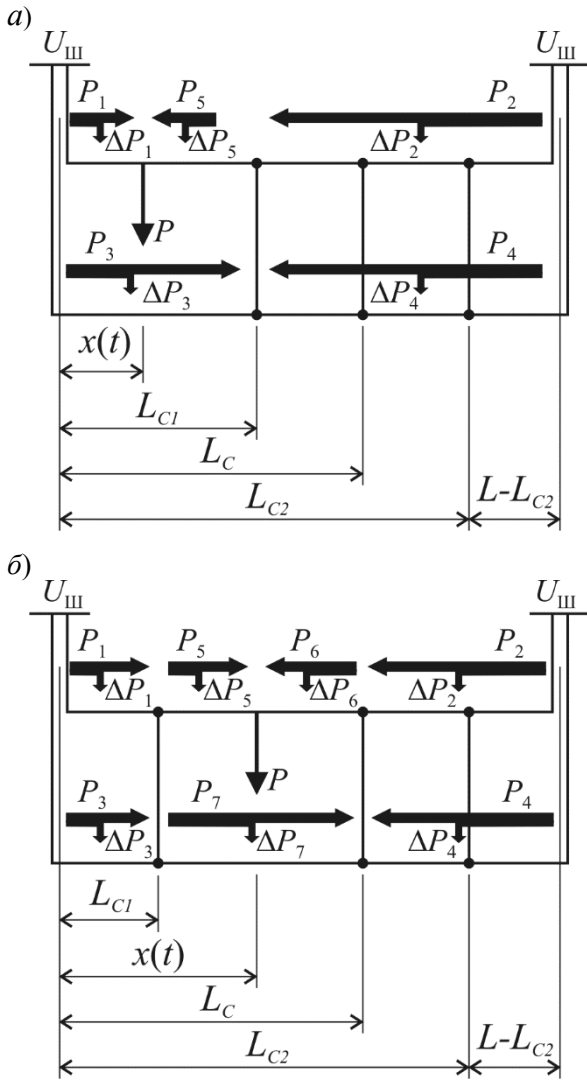


Рис. 7. Розрахункові схеми для паралельної схеми живлення

Таким чином, для першого випадку (рис. 7, а) в кожен момент часу справедлива рівність

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_5 - \Delta P_5, \quad (10)$$

де

$$P_5 = P_2 - \Delta P_2 + P_3 - \Delta P_3 + P_4 - \Delta P_4. \quad (11)$$

Вважаючи, що споживана електровозом потужність визначається як $P = U \cdot I$, визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$\begin{aligned} P_1 - \Delta P_1 &= U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot x \cdot I_1^2; \\ P_2 - \Delta P_2 &= U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I_2^2; \\ P_3 - \Delta P_3 &= U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2; \\ P_4 - \Delta P_4 &= U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I_4^2; \\ \Delta P_5 &= r_0 \cdot (L_{C1} - x) \cdot (I_2 + I_3 + I_4)^2, \end{aligned}$$

де I_1, I_2, I_3, I_4 – струми фідерів відповідно першої (1, 3) та другої (2, 4) підстанції.

Беручи за основу формули розподілу струмів для вузлової схеми живлення та відповідно змінюючи їх до паралельної, матимемо

$$\begin{aligned} P_1 - \Delta P_1 &= U_{\text{ш}} I \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right) - \\ &\quad - r_0 \cdot x \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_2 - \Delta P_2 &= U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - \\ &\quad - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_3 - \Delta P_3 &= U_{\text{ш}} I \left(\frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right) - \\ &\quad - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I^2 \left(\frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_4 - \Delta P_4 &= U_{\text{ш}} I \frac{x}{2L} - \\ &\quad - r_0 \cdot (L - L_{C1}) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} \right)^2; \end{aligned}$$

$$\Delta P_5 = r_0 \cdot (L_{C1} - x) \cdot I^2 \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_{C1}} \right)^2.$$

Користуючись (11), визначимо по-черзі складові рівняння (10), а саме

$$\begin{aligned} P_1 + P_5 &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = \\ &= U_{\text{ш}} I \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} x + \frac{x}{2L} + \frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} x + \frac{x}{2L} \right) = \end{aligned}$$

$$= U_{\text{ш}} I;$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_5 = r_0 I^2 \times$$

$$\begin{aligned} &\times \left[x \cdot \left(1 - \frac{L + L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2 + (L - L_{C1}) \cdot \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + L_{C1} \cdot \left(\frac{L - L_{C1}}{2LL_{C1}} \cdot x \right)^2 + (L - L_{C1}) \cdot \left(\frac{x}{2L} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + (L_{C1} - x) \cdot \left(\frac{x}{2L} + \frac{x}{2L_{C1}} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

Спрощуючи вираз у дужках, отримаємо

$$\Delta P_1 + \Delta P_5' = r_0 I^2 \times \left[x - x^2 \left(\frac{1}{L} + \frac{3}{4L_{C1}} - \frac{L_{C1}}{4L_C^2} - \frac{L_{C1}}{2LL_C} \right) - x^3 \left(\frac{1}{4L_C^2} - \frac{1}{4L_{C1}^2} + \frac{1}{2LL_C} - \frac{1}{2LL_{C1}} \right) \right].$$

Тобто, функція опору для паралельної схеми живлення при знаходженні навантаження між першою підстанцією та пунктом паралельного з'єднання підвісок матиме вигляд

$$f(x) = r_0 \left[x - x^2 \left(\frac{1}{L} + \frac{3}{4L_{C1}} - \frac{L_{C1}}{4L_C^2} - \frac{L_{C1}}{2LL_C} \right) - x^3 \left(\frac{1}{4L_C^2} - \frac{1}{4L_{C1}^2} + \frac{1}{2LL_C} - \frac{1}{2LL_{C1}} \right) \right].$$

При переміщенні навантаження за перший пункт паралельного з'єднання підвісок зміниться структура розподілу потужностей (рис. 7, б). Тому переписемо баланс потужностей та структуру його складових, а саме

$$P = P_5 - \Delta P_5 + P_6 - \Delta P_6, \quad (12)$$

де

$$P_5 = P_1 - \Delta P_1 + P_3 - \Delta P_3 - P_7; \quad (13)$$

$$P_6 = P_2 - \Delta P_2 + P_4 - \Delta P_4 + P_7 - \Delta P_7. \quad (14)$$

Пам'ятаючи, що споживана електровозом потужність визначається як $P = U \cdot I$, визначимо інші складові балансу потужностей для цього моменту часу:

$$\begin{aligned} P_1 - \Delta P_1 &= U_{\text{ш}} I_1 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_1^2; \\ P_2 - \Delta P_2 &= U_{\text{ш}} I_2 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2; \\ P_3 - \Delta P_3 &= U_{\text{ш}} I_3 - r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2; \\ P_4 - \Delta P_4 &= U_{\text{ш}} I_4 - r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2; \\ \Delta P_5 &= r_0 \cdot (x - L_{C1}) \cdot I_5^2; \\ \Delta P_6 &= r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I_6^2; \\ \Delta P_7 &= r_0 \cdot (L_C - L_{C1}) \cdot I_7^2; \\ P_7 &= U_{C1} I_7; \quad U_{C1} = U_{\text{ш}} - I_1 \cdot r_0 \cdot L_{C1}. \end{aligned}$$

В свою чергу,

$$I_1 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I; \quad I_3 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I;$$

$$I_2 = \frac{x}{2L} I; \quad I_4 = \frac{x}{2L} I;$$

$$I_7 = (I_1 + I_3) \frac{x - L_{C1}}{2(L_C - L_{C1})} -$$

$$-(I_2 + I_4) \frac{L_C - x}{2(L_C - L_{C1})};$$

$$I_5 = (I_1 + I_3) \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})};$$

$$I_6 = (I_2 + I_4) \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})}.$$

Використовуючи (13), визначимо по-черзі складові рівняння (12), а саме

$$P_5 + P_6 = U_{\text{ш}} I_1 + U_{\text{ш}} I_3 - U_{C1} I_7 + U_{\text{ш}} I_2 + U_{\text{ш}} I_4 + U_{C1} I_7.$$

На підставі формул струморозподілу можна перетворити отримане рівняння наступним чином

$$\begin{aligned} P_5 + P_6 &= \\ &= U_{\text{ш}} I \left[\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{x}{2L} + \frac{x}{2L} \right] = \\ &= U_{\text{ш}} I. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_5' + \Delta P_6' &= \Delta P_1 + \Delta P_3 + \Delta P_5 + \\ &+ \Delta P_2 + \Delta P_4 + \Delta P_6 + \Delta P_7. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_5' + \Delta P_6' &= r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_1^2 + r_0 \cdot L_{C1} \cdot I_3^2 + \\ &+ r_0 \cdot (x - L_{C1}) \cdot I_5^2 + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_2^2 + \\ &+ r_0 \cdot (L - L_C) \cdot I_4^2 + r_0 \cdot (L_C - x) \cdot I_6^2 + \\ &+ r_0 \cdot (L_C - L_{C1}) \cdot I_7^2. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_5' + \Delta P_6' &= r_0 \cdot L_{C1} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I \right)^2 + \\ &+ r_0 \cdot L_{C1} \cdot \left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I \right)^2 + r_0 \cdot (x - L_{C1}) \times \\ &\times \left(\left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) I \right) \frac{2L_C - L_{C1} - x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\ &+ r_0 \cdot (L - L_C) \cdot \left(\frac{x}{2L} I \right)^2 + r_0 \cdot (L - L_C) \cdot \left(\frac{x}{2L} I \right)^2 + \\ &+ r_0 \cdot (L_C - x) \cdot \left(\left(\frac{x}{2L} I + \frac{x}{2L} I \right) \frac{L_C - 2L_{C1} + x}{2(L_C - L_{C1})} \right)^2 + \\ &+ r_0 (L_C - L_{C1}) \left[\left(\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right) \right) \times \right. \end{aligned}$$

$$\times \left[\frac{x-L_{C1}}{2(L_C-L_{C1})} - \left(\frac{x}{2L} I + \frac{x}{2L} I \right) \frac{L_C-x}{2(L_C-L_{C1})} \right]^2$$

$$\Delta P_5' + \Delta P_6' = r_0 \cdot I^2 \left[L_{C1} \cdot \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{L} \right)^2 + (x-L_{C1}) \times \right.$$

$$\times \left(1 - \frac{x}{L} \right)^2 \left(\frac{2L_C-L_{C1}-x}{2(L_C-L_{C1})} \right)^2 + 2(L-L_C) \cdot \left(\frac{x}{2L} \right)^2 +$$

$$\left. + (L_C-x) \cdot \left(\frac{x}{L} \right)^2 \left(\frac{L_C-2L_{C1}+x}{2(L_C-L_{C1})} \right)^2 + (L_C-L_{C1}) \times \right.$$

$$\left. \times \left[\left(1 - \frac{x}{L} \right) \frac{x-L_{C1}}{2(L_C-L_{C1})} - \frac{x}{L} \cdot \frac{L_C-x}{2(L_C-L_{C1})} \right]^2 \right]$$

В результаті, остаточно отримаємо

$$f(x) = r_0 \times$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x - \frac{x^2}{2L} - \frac{x^2}{2L_{C1}}, \\ 0 \leq x \leq L_{C1}; \\ \frac{x^2 - 2L_C x + L_C L_{C1}}{2L_C - 2L_{C1}} - \frac{L_C x^2 - L_{C1} x^2}{2L(L_C - L_{C1})}, \\ L_{C1} \leq x \leq L_C; \\ \frac{x^2 - 2L_{C2} x + L_C L_{C2}}{2L_C - 2L_{C2}} - \frac{L_C x^2 - L_{C2} x^2}{2L(L_C - L_{C2})}, \\ L_C \leq x \leq L_{C2}; \\ - \frac{(L-x) \cdot (LL_{C2} - 2Lx + L_{C2}x)}{2L(L-L_{C2})}, \\ L_{C2} \leq x \leq L. \end{array} \right.$$

За результатами розрахунків паралельної схеми живлення для прийнятих умов отримані наступні сімейства струмів парних (рис. 8, а) та непарних фідерів (рис. 8, б). Подібним чином отримані залежності напруги на струмоприймачі електровозу (рис. 9).

Виконаємо перевірку відповідності балансу електричної енергії для прийнятих вихідних даних і потужності споживання електровозом на рівні 3,3 МВт. Для чого обчислимо фактичну потужність, спожиту електровозом, як добуток напруги на струмоприймачі та струму для кожної схеми живлення, а за отриманими формулами функцій опору $f(x)$ – втрати потужності в контактній мережі, як добуток квадрату струму електровозу на відповідно функцію опору, тобто

$$\Delta P = I^2 \cdot f(x). \quad (15)$$

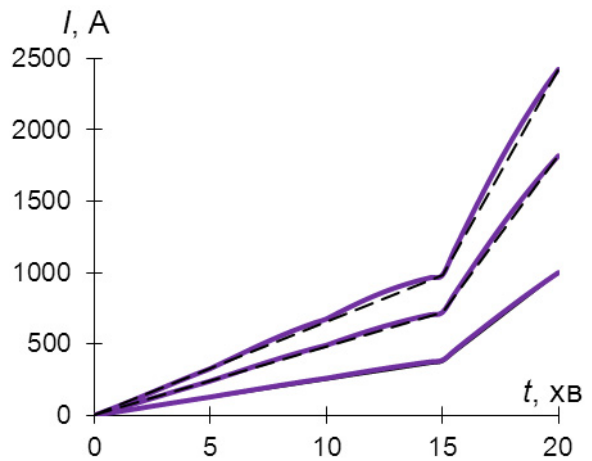
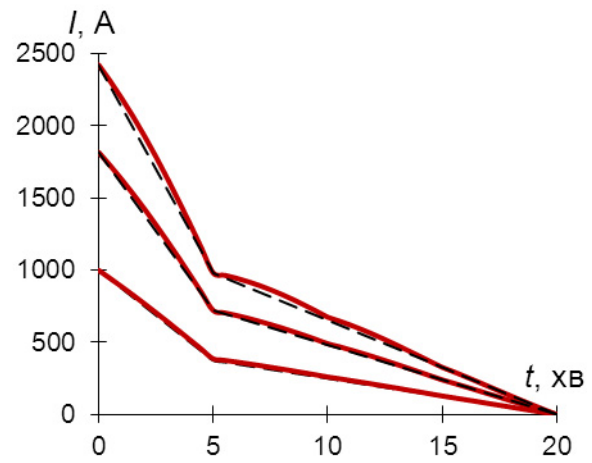


Рис. 8. Сімейства струмів попутних фідерів паралельної схеми живлення за двома методами розрахунку

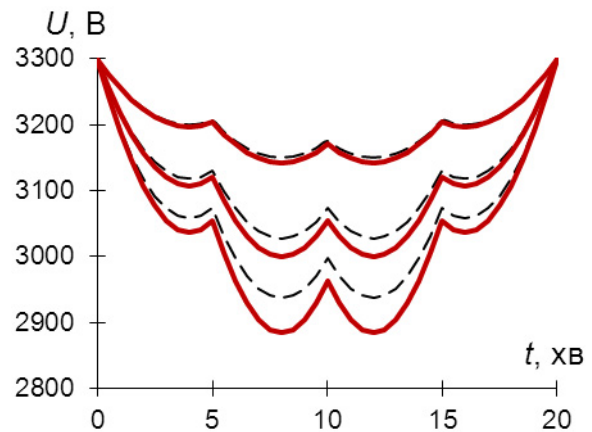


Рис. 9. Залежності напруги на струмоприймачі електровозу для паралельної схеми, визначені двома методами

Як видно з рис. 10, потужність електровозу для кожного моменту часу виходить постійною, а змінюються лише втрати в залежності від схеми живлення. При цьому, постійність потужності забезпечується збільшенням споживаного електровозом струму з врахуванням фактичного зниження напруги на струмоприймачеві.

Таким чином, значення потужності 3,3 МВт за класичного підходу до розрахунку миттєвих схем відповідає випадку, коли напруга на струмоприймачеві підтримується за допомогою стороннього джерела потужності на рівні 3,3 кВ при споживанні струму в 1000 А.

Насправді, система підтримання постійної потужності сучасного електрорухомого складу збільшуватиме первинний струм електровозу на величину покриття втрат в системі електропостачання, які в загальному випадку залежать від багатьох факторів, а для прийнятих для наочності припущень, повторюватимуть форму відомих залежностей втрат потужності для різних схем живлення (рис. 11).

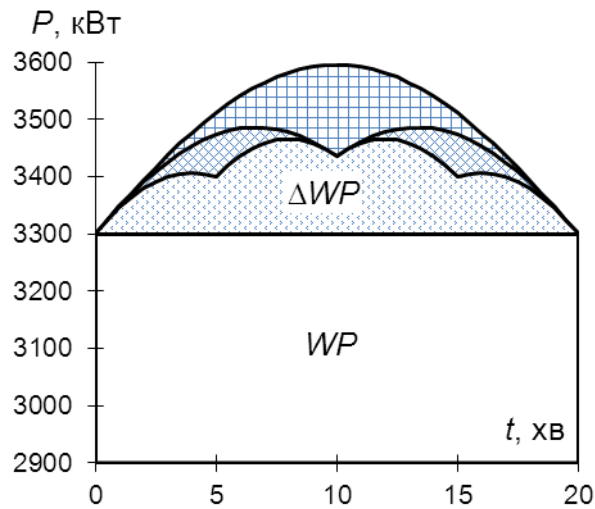


Рис. 10. Складові балансу електричної енергії для різних схем живлення

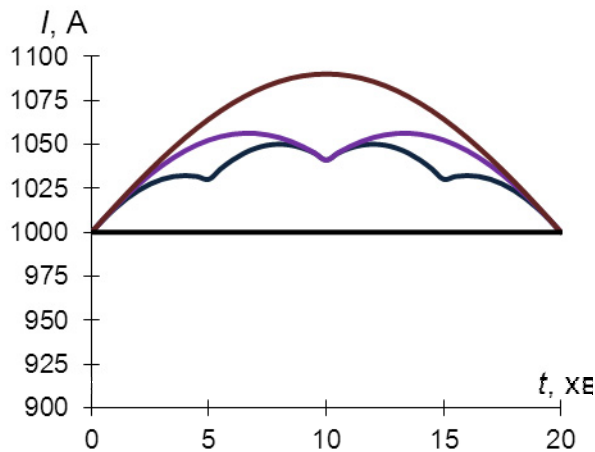


Рис. 11. Струм електровозу для різних схем живлення за умови споживання заданої потужності

Другими словами, розроблена методика розрахунку миттєвих схем дозволяє визначити у будь-який момент часу для заданої схеми живлення такий струм електровозу, що відповідатиме споживанню необхідної потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачі електровозу.

Висновки

Заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму для розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання вносить суттєву похибку в розрахунки струмів фідерів, напруги на струмоприймачеві та втрати потужності. Похибка збільшується зі збільшенням потужності, що реалізується електрорухомим складом. Внаслідок того, що при проектуванні системи електропостачання це явище не враховувалось, погіршуються тягового-енергетичні характеристики існуючого електрорухомого складу при одночасній експлуатації з сучасним, системи управління якого дозволяють стабілізувати значення тягової потужності.

На підставі балансу та розподілу потужностей для різних схем живлення контактної мережі в аналітичному виді отримані функції опору, які фізично визначають закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомого тягового навантаження.

Запропонована методика розрахунку миттєвих схем з використанням аналітичних функцій опору дозволяє виконати електричні розрахунки системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомим складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Решение задач энергоснабжения на электронных машинах [Текст] / Р. И. Мирошниченко, Н. Я. Пузанов, М. Б. Улановский, Д. А. Палей, М. С. Гочуа. – М.: Транспорт, 1971. – 168 с.

REFERENCES

1. Miroshnichenko R. I., Puzanov N. Ya., Ulanovskiy M. B., Paley D. A., Gochua M. S. *Reshenie zadach energosnabzheniya na elektronnykh mashinakh* [Meeting the challenges of energy supply to the electron-

2. Босий, Д. О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму [Текст] / Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2008. - Вип. 24. - С. 49-54.

3. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. - Т. 1. - 456 с.

4. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. - Дн-вск: Изд-во Маковецкий, 2011. - Т. 2. - 364 с.

5. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока [Текст] / Б. А. Аржанников. - Екатеринбург: УрГУПС, 2010. - 176 с.

6. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2009. - Вип. 29. - С. 82-87.

7. Сиченко В. Г. Voltage quality on traction load buses of DC substations / В. Г. Сиченко // Електрифікація транспорту. - 2013. - № 6. - С. 58-63.

8. Сиченко, В. Г. Моделювання електромагнітних процесів у тяговій мережі постійного струму / В. Г. Сиченко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. - Д., 2011. - Вип. 38. - С. 110-113.

Надійшла до друку 27.11.2014.

Ключові слова: система електропостачання, електрична тяга, миттєва схема, баланс, розподіл, постійна потужність, функція опору, режими напруги.

ic machines]. Moscow, Transport Publ., 1971. 168 p.

2. Bosiy D. O. Imitatsiyne modelyuvannya systemy tyahovoho elektropostachannya dlya doslidzhennya pokaznykiv yakosti elektrychnoyi enerhiyi na tyahovykh pidstantsiyakh zminnoho strumu [Simulation the Traction Power Supply System for research of quality indices of electricity for AC traction substations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 24, pp. 49-54.

3. Get'man G. K. *Teoriya elektricheskoy tyagi. T. 1* [The theory of electric traction. Vol 1]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 456 p.

4. Get'man G. K. *Teoriya elektricheskoy tyagi. T. 2* [The theory of electric traction. Vol 2]. Dnipropetrovsk, Makovetskiy Publ., 2011. 364 p.

5. Arzhannikov B. A. *Sistema upravlyaemogo elektrosnabzheniya elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog postoyannogo toka* [System-managed power supply of DC electrified railways]. Ekaterinburg, UrGUPS Publ., 2010. 176 p.

6. Sychenko V. H., Bosiy D. O. Analiz rezhymiv napruhy na pryednannyakh tyahovykh pidstantsiy zminnoho strumu [Analysis the modes of voltage on the connections for AC traction substations]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 29, pp. 82-87.

7. Sychenko V. H. Voltage quality on traction load buses of DC substations. *Elektryfikatsiya transport - Electrification of transport*, 2013, issue 6, pp. 58-63.

8. Sychenko V. H. Modelyuvannya elektromagnitnykh protsesiv u tyahoviyi merezhi postiynoho strumu [Simulation the electromagnetic processes in DC traction network]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2011, issue 38, pp. 110-113.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

Електричні розрахунки систем тягового електропостачання прийнято виконувати з припущенням того, що реалізована електрорухомих складом потужність визначається лише значенням струму при номінальній напрузі. Поява сучасного електрорухомих складу, система управління якого здатна підтримувати постійну споживану потужність, та його експлуатація одночасно з існуючим призводить до невідповідності режиму напруги в тяговій мережі через прийняті припущення в розрахунках параметрів системи тягового електропостачання при проектуванні.

Проведені дослідження показали, що заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму вносить суттєву похибку в розрахунки струмів фідерів, напруги на струмоприймачеві та втрати потужності в тяговій мережі. За допомогою визначення балансу та розподілу потужностей для різних схем живлення контактної мережі в аналітичному виді отримані функції опору, які фізично визначають закономірність зміни опору тягової мережі відносно рухомих тягового навантаження.

Отримані співвідношення функцій опору дозволяють сформулювати методику розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання при споживанні електрорухомих складом заданої потужності при фактичному значенні напруги на струмоприймачеві.

Можливість застосування прямого розрахунку електричних величин за допомогою наведеної методики та аналітичні вирази отриманих для різних схем живлення контактної мережі функцій опору дозволяють значно спростити подальші оптимізаційні розрахунки режимів роботи систем тягового електропостачання.

УДК 621.331.3

Д. А. БОСЬЙ (ДНУЖТ)

Кафедра Електроснабжені залізничних доріг, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: dake@i.ua

МЕТОДИКА РАСЧЕТА МГНОВЕННЫХ СХЕМ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ МОЩНОСТИ

Електрические расчеты систем тягового электроснабжения принято выполнять с предположением того, что мощность, которая реализуется электроподвижным составом, определяется только значением тока при номинальном напряжении. Появление нового электроподвижного состава, система управления которого способна поддерживать постоянную мощность, и его эксплуатация совместно с существующим приводит к несоответствию режима напряжения в тяговой сети из-за принятых упрощений в расчетах параметров системы тягового электроснабжения при проектировании.

Проведенные исследования показали, что замена тяговой нагрузки источником идеального тока вносит существенную погрешность в расчеты токов фидеров, напряжения на токоприемнике и потерь мощности в тяговой сети. С помощью определения баланса и распределения мощностей для разных схем питания контактной сети в аналитическом виде получены функции сопротивления, которые физически определяют закономерность изменения сопротивления тяговой сети относительно подвижной тяговой нагрузки.

Полученные соотношения функций сопротивления позволяют сформулировать методику расчета мгновенных схем системы тягового электроснабжения при потреблении электроподвижным составом заданной мощности при фактическом значении напряжения на токоприемнике.

Возможность применения прямого расчета электрических величин с помощью приведенной методики и полученные аналитические выражения функций сопротивления для разных схем питания контактной сети позволяют значительно упростить дальнейшие оптимизационные расчеты режимов работы систем тягового электроснабжения.

Ключевые слова: система электроснабжения, электрическая тяга, мгновенная схема, баланс, распределение, постоянная мощность, функция сопротивления, режимы напряжения.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

D. O. BOSIY (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: dake@i.ua

METHOD OF CALCULATION THE INSTANTANEOUS SCHEMES OF ELECTRIC TRACTION SYSTEM FOR CONSTANT POWER CONSUMPTION

Electrical calculations of traction power supply systems usually perform with the assumption that power of the electric rolling stock is determined only by the value of the current at nominal voltage. The using a new electric rolling stock with control system which able to maintain a constant power and its operation together with the existing results in the mismatch of the voltage mode in the traction network due to the simplifications that made in the calculation of the parameters of the traction power supply system when it was engineered.

Conducted researches have shown that the replacement of traction load by an ideal current source makes a significant error in the calculation of the currents of the feeders, the voltages on the pantographs and the power loss in the traction network. By determining the balance and the power distribution for the different schemes analytically were determined the functions of resistance that physically determines the resistance change depends on the moving traction load.

The obtained functions of resistance allow us to formulate a method of calculation the instantaneous schemes of electric traction system for constant power consumption of the electric rolling stock with the fixed power value and the actual voltage value on the pantograph.

The possibility of the direct electrical calculation using the above mentioned methods and the obtained analytical expressions of the resistance functions might simplify the further optimization the working modes of the traction power supply systems.

Keywords: power supply system, electric traction, instantaneous scheme, balance, distribution, constant power, function of resistance, voltage modes.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

© Босий Д. О., 2014

О. А. ДАНИЛОВ (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. Лазаряна,
вул. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел./факс (096) 2235983, ел. пошта: fduch@ua.fm

СПРОЩЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ ПО ЗБІЛЬШЕННЮ СТРУМУ

Вступ

Тягові навантаження електрифікованих залізниць постійного струму, на відміну від навантажень інших споживачів електроенергії, характеризуються особливими властивостями. Їх значення практично весь час змінюються, а зміни носять випадковий і, у більшості випадків, мають швидкозмінний характер. Аварійний режим також характеризується збільшенням струму. Протікання струму короткого замикання, навіть короткочасно, може привести до перепалу контактної мережі. Тягова мережа не має резерву, тому її захист повинний бути безвідмовним і швидкодіючим.

Основним пристроєм для захисту фідерів контактної мережі постійного струму електрифікованих залізниць є швидкодіючі вимикачі (ШВ), в яких реалізований максимальний імпульсний захист (МІЗ). Він реагує не тільки на величину струму, але й на швидкість його зміни. Крім того він автоматично адаптується під попередні значення струму, які протікали до аварії. Однак їхніх можливостей, пов'язаних з визначенням режимів роботи тягової мережі: аварійний або нормальний, недостатньо. Останнім часом все більше впроваджуються мікропроцесорні захисти. Для захисту від аварійних режимів фідерів контактної мережі постійного струму найбільше розповсюдження отримали мікропроцесорні комплекти ЦЗАФ-3,3 [1].

Аналіз існуючих методів розрахунку

Мікропроцесорний комплект ЦЗАФ-3,3 включає в собі декілька автономних захистів. Захист по збільшенню струму виник, як спроба імітувати роботу МІЗ швидкодіючого вимикача. ШВ з індуктивним шунтом спрацьовує при різних кидках струму в залежності від попереднього навантаження. Чим більше навантаження, тим менший кидок струму викликає відключення ШВ. Для реалізації функції максимального імпульсного струмового захисту в мікропроцесорному захисті ЦЗАФ-3,3 використовується захист по збільшенню струму (ЗПТ). Далі всі скорочення захистів надаються такими, які використовуються в офіційній до-

кументації на ЦЗАФ-3,3 [1]. Для його налаштування необхідно визначити чотири значення: $T_{и}$ – час вимірювання приросту струму; $dI_{уст}$ – уставка по збільшенню струму; $K_{а}$ – коефіцієнт адаптації; $T_{в}$ – витримка часу на відключення.

Складність визначення цих параметрів полягає в тому, що $dI_{уст}$ залежить від $T_{и}$, а $K_{а}$ залежить від $dI_{уст}$ і струмів в нормальному режимі. Існуючі методи для розрахунку цих параметрів, використовують деякі припущення і аналіз відомих навантажень. Але зазначається, що в разі хибних спрацьовувань, необхідно коригувати значення, або провести розрахунки з використанням імітаційного моделювання [2].

Для розуміння, як правильно налаштувати цей захист, необхідно скористуватися графіком спрацьовування з осями струму навантаження та кидків струму. Розробники цього захисту пропонують співвідношення струмів навантаження до кидків струму таке, як зображено на рис. 1 [3]. На цьому рисунку: I – вісь струмів; ΔI – вісь збільшення струмів; $I_{у}$ – струм уставки максимального струмового захисту (МТЗ); $\Delta I_{у0}$ – уставка по збільшенню струму.

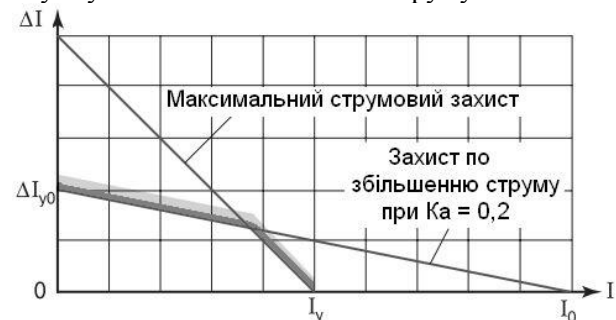


Рис. 1. Характеристика спрацьовування захисту по збільшенню струму

Область спрацьовування захисту позначена широкою смугою.

Як видно з рис. 2, збільшення струму залежить від сталого струму короткого замикання ($I_{кз}$), постійної часу кола к.з. ($T_{к}$), часу вимірювання ($T_{и}$), струму навантаження ($I_{нав}$), який протікав до виникнення аварії. Ця залежність описується відомою формулою зміни струму [4]

$$i_k = I_H + (I_K - I_H)(1 - e^{-t/T_K}) = I_H + \Delta I(1 - e^{-t/T_K}) \quad (1)$$

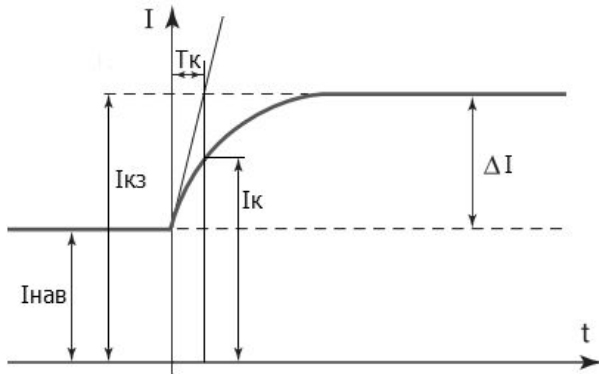


Рис. 2. Характер зміни струму к.з. в залежності від навантаження

Коефіцієнт K_a відображає зменшення кидків струму при збільшенні струму навантаження. Графічно він є кутом нахилу відрізка $[\Delta I_{y0}; I_0]$ на рис. 1.

По інструкції вибору уставок [5] коефіцієнт K_a орієнтовно можна знайти по формулі:

$$K_a = (0,22 \div 0,26)(1,5 \div 2) \frac{\Delta I_{ЕРСмакс}}{0,8 \cdot I_{ЕРСмакс}} \quad (2)$$

де $\Delta I_{ЕРСмакс}$ – максимальне значення збільшення струму електровоза, А;

$I_{ЕРСмакс}$ – максимальний пусковий струм, А.

Недоліком цієї формули є великий розбіг значення при виборі різних коефіцієнтів (більше 60%) і складність вибору струмів е.р.с. при наявності різних типів електровозів.

По інструкції розрахунку уставок [6] коефіцієнт K_a рекомендовано визначати по формулі:

$$K_a \leq \frac{(1-a)\Delta I_{y0}}{I_{H,max}} \quad (3)$$

де a – коефіцієнт від 0,7 до 0,8;

$$\Delta I_{y0} < \frac{I_{k,min}}{1,15} \quad (4)$$

де $I_{k,min}$ – мінімальний струм к.з.

По цій формулі коефіцієнт K_a розраховується досить приблизно. Тому потім необхідно виконати перевірку по формулі, в якій є середній струм навантаження і максимальне збільшення струму при нормальному режимі. Як і теж можна підрахувати досить приблизно.

Струм при к.з. залежить від часу. Тому значення збільшення струму при аварії залежить від часу виміру. В обох інструкціях рекомендовано приймати час вимірювання T_i від 0,1 до

0,5 секунди в залежності від типу контактної мережі.

Розрахунки та дослідження

Мікропроцесорний захист фідерів контактної мережі постійного струму ЦЗАФ-3,3 включає декілька захистів, які відстежують зміну струму. Всі вони програмуються окремо. Для розрахунку уставок максимального струмового захисту (МТЗ) необхідно розрахувати найбільший опір кола к.з. (R_k), мінімальний струм к.з., струм уставки МТЗ ($I_{устМТЗ}$). Для захисту, який реагує на швидкість зростання струму (ЗСНТ) необхідно розрахувати індуктивність кола к.з. (L_k). Всі ці величини використовуються для розрахунку параметрів захисту ЗПТ. Тому розрахунок уставок захисту ЗПТ доцільно виконувати після розрахунку захистів МТЗ і ЗСНТ.

Для розрахунку K_a необхідно визначити збільшення струму для різних навантажень за деякий постійний проміжок часу T_i . Проаналізувавши багато осцилограм різних к.з., було прийняте рішення про доцільність приймати час вимірювання (T_i) рівний постійній часу кола к.з. (T_k). Це дозволяє спростити розрахунок:

$$(1 - e^{-t/T_k}) = (1 - e^{-T_i/T_k}) = (1 - e^{-1}) = 0,632 \quad (5)$$

Для розробки формул уставок використаємо графічне зображення на рис 3.

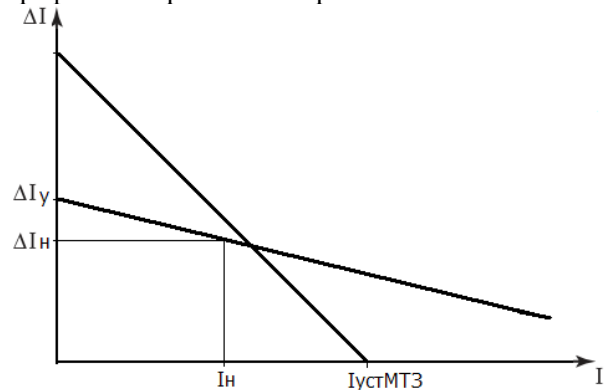


Рис. 3. Графік для визначення уставок ЗПТ

Коефіцієнт адаптації графічно відображає кут нахилу. Для прямої $I_{устМТЗ}$ $K_a=1$. Для прямої ΔI_y коефіцієнт адаптації можна знайти по формулі:

$$K_a = (\Delta I_y - \Delta I_H) / R_k \quad (6)$$

де ΔI_y – мінімальне збільшення струму к.з. при відсутності навантаження;

ΔI_H – мінімальне збільшення струму к.з. при навантаженні I_H ;

I_H – середнє навантаження фідера.

Для розрахунку приймаємо, що $T_{и}=T_{к}$. Тоді отримаємо:

$$\Delta I_{y} = 0,632(0,95U_{xx} - U_{д}) / R_{к}, \quad (7)$$

де U_{xx} – напруга холостого ходу на шинах +3,3кВ, (В);

$U_{д}$ – падіння напруги в дузі (можна приймати 200 В), (В);

$R_{к}$ – опір кола к.з.

0,95–коефіцієнт, який враховує 5% зниження напруги в енергосистемі;

0,632 – частка збільшення струму за час $t=T_{к}$.

$$\Delta I_{y} = 0,632(0,95U_{xx} - I_{н} \cdot R_{п} - U_{д}) / R_{к}, \quad (8)$$

де $I_{н}$ – середнє навантаження фідера;

$R_{п}$ – внутрішній опір підстанції.

Розрахунок по цим формулам дозволяє достатньо просто і, в той же час, точно визначити параметри захисту по збільшенню струму. Всі дані вже відомі з попередніх розрахунків при визначенні параметрів для максимального струмового захисту.

Постійна часу $T_{к}$ залежить від відстані між підстанцією і точкою к.з. Зі збільшенням відстані $T_{к}$ зменшується. Це пояснюється тим, що відношення індуктивності реактора до опору підстанції більше, ніж відношення індуктивності тягової мережі до її опору. Для розрахунку уставок релейного захисту завжди беруть найгірші ситуації. За менший час струм зросте на

менше значення. Крім того захист ЗПТ повинен захищати всю лінію без мертвих зон. Тому $T_{к}$ необхідно розраховувати на всю довжину лінії, яку захищає захист. Для перевірки цього методу розрахунку використовувались експериментальні данні штучних к.з. двоколіїної дільниці з тяговою мережею М120+2МФ100+Р65.

Час вимірювання в пристрої ЦЗАФ-3,3 можна виставляти від 0 до 990 мс з інтервалом 10 мс. Інтервал 10 мс достатньо великий і може вносити похибки між розрахунками і реальною роботою захисту. В захисті МРЗС діапазон часу від 0 до 500 мс з інтервалом 1 мс, який забезпечує точне налаштування часу вимірювання згідно з розрахунками.

Висновки

Мікропроцесорний захист по швидкості зростання струму імітує роботу швидкодіючого вимикача з індуктивним шунтом. Він мав бути одним з основних захистів фідерів контактної мережі постійного струму. Враховуючи складність і неоднозначність розрахунків уставок, на практиці він майже не використовується.

Приймаючи час вимірювання рівний постійній часу кола короткого замикання, можна значно спростити розрахунки без внесення додаткової похибки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Устройство цифровых защит и автоматики фидеров ЦЗАФ-3,3. Руководство по эксплуатации 1СР.251.208-01РЭ. С-Петербург, Издательство НИИЭФА-ЭНЕРГО, 2005 г. – 74 с.
2. Кузнецов, С.М. Выбор уставок электронных защит с коррекцией на имитационной модели / С.М. Кузнецов, И.С. Демиденко, А.В. Гашкова [и др.], Транспорт: Наука, Техника, Управление // ВИНТИ.– 2011.–№12.– С. 22-24.
3. Гречишников, В.А. Сравнительный анализ существующих максимально-импульсных защит, реализуемых в блоках микропроцессорных защит БЗ-М1 или ЦЗАФ-3,3 / В.А. Гречишников., В.Н. Пупынин. Журнал «Электро», 2004 №3. – С. 11-14.
4. Фигурнов Е.П. Релейная защита: Учебник. В 2ч. Ч.2. 3-е изд. Перераб. И доп. [Текст] / Е.П. Фигурнов.-М.:ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. – 604 с.
5. Инструкция по выбору уставок защит терминала ЦЗАФ-3,3.(дополнение к части 1-ой «Руководящих материалов по релейной защите систем тягового электроснабжения», ЦЭ ОАО «РЖД», 2005 г)-М., 2009. – 51 с.
6. Инструкция о порядке расчета и выбора уставок защиты тяговой сети постоянного тока, 2012. – 96 с.

REFERENCES

1. Ustroystvo tsifrovyyih zaschit i avtomatiki fiderov TsZAF-3,3. Rukovodstvo po ekspluatatsii [Device of digital defence and automats of фидеров of ЦЗАФ- 3,3. Guidance on exploitation] 1SR.251.208-01RE. S-Peterburg, Izdatelstvo NIIЕFA-ENERGO, 2005. 74 p.
2. Kuznetsov, S.M. Vyibor ustavok elektronnyih zaschit s korrektsiey na imitatsionnoy modeli [Choice of setpoints of electronic protection with a correction on a simulation model], Transport: Nauka, Tehnika, Upravlenie // VINITI, 2011, no. 12, pp. 22-24.
3. Grechishnikov, V.A., Pupyinin V.N. Sravnitelnyiy analiz suschestvuyuschih maksimalno-impulsnyih zaschit, realizuemyih v blokah mikroprotsessornyih zaschit BZ-M1 ili TsZAF-3,3 [Comparative analysis of existing maximally-impulsive protection, realized in blocks microprocessor protections BZ-M1 or CZAF-3,3] «Elektro», 2004, no 3, pp. 11-14.
4. Figurnov E. P. Releynaya zaschita: Uchebnik. [Relay protection. Textbook] V 2ch. Ch.2. 3-e izd. Pere-rab. I dop. .-M.:GOU «Uchebno-metodicheskiy tse-ntр po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte» [Educational methodical center is by education on a railway transport], 2009. 604 p.
5. Instruksiya po vyiboru ustavok zaschit terminala TsZAF-3,3.(dopolnenie k chasti 1-oy «Rukovodyaschih materialov po releynoy zaschite sistem tyagovogo el-

Надійшла до друку 14.10.2014.

Ключові слова: тягова мережа, захист релейний мікропроцесорний, постійний струм, вимикач швидкодіючий, струмовий захист.

ektrosnabzheniya» [Instruction on the choice of set-points of protection terminal of CZAF- 3,3.(adding to part of 1th "Leading materials on relay defence of the systems of hauling power supply"], TsE OAO «RZhD», 2005 g), Moscow, 2009, 51 p.

6. Instruktsiya o poryadke rascheta i vyibora ustavok zaschityi tyagovoy seti postoyannogo toka [Instruction about the order of calculation and choice of setpoints of defence of traction network of direct-current], 2012, 96 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

Захист контактної мережі постійного струму відіграє важливу роль в забезпеченні надійності роботи електропостачання залізниць. Нові мікропроцесорні захисти фідерів контактної мережі постійного струму включають в собі декілька незалежних захистів. Для налаштування захисту по збільшенню струму необхідно визначити параметри, які знаходяться в залежності між собою. Тому уставка для цього захисту може розраховуватися в декілька циклів підбором коефіцієнтів і все одно в процесі експлуатації потребує подальшого уточнення. Мета роботи полягає у визначенні необхідних параметрів для налаштування захисту по збільшенню струму простим на практиці розрахунком, але в той же час достатньо точним. В статті показано, що приймаючи час вимірювання зміни струму кратний постійній часу кола короткого замикання можна достатньо спростити розрахунки і визначити всі параметри для налаштування мікропроцесорного захисту.

УДК 621.332:621.316.93

А. А. ДАНИЛОВ (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел./факс (096) 2235983, эл. почта: fduch@ua.fm

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ЗАЩИТЫ ПО ПРИРАЩЕНИЮ ТОКА

Защита контактной сети постоянного тока играет большую роль в обеспечении надежной работы электрооборудования железных дорог. Новые микропроцессорные защиты фидеров контактной сети постоянного тока включают в себя несколько независимых защит. Для настройки защиты по приращению тока необходимо определить параметры, которые находятся в зависимости между собой. Поэтому уставка для этой защиты может рассчитываться в несколько циклов подбором коэффициентов и все равно в процессе эксплуатации возникает необходимость дальнейшего уточнения. Цель работы заключается в определении необходимых параметров для настройки защиты по приращению тока простым на практике расчетом, но в тоже время достаточно точным. В статье показано, что принимая время измерения тока кратное постоянной времени цепи короткого замыкания можно упростить расчеты и определить все параметры для настройки микропроцессорной защиты.

Ключевые слова: тяговая сеть, защита релейная микропроцессорная, постоянный ток, выключатель быстродействующий, токовая защита.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

UDC 621.332:621.316.93

O. A. DANYLOV (DNURT)

Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryan, 2 Lazaryan Street, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. (0562) 471674, e-mail: fduch@ua.fm

SIMPLIFIED METHOD OF CALCULATION OF PARAMETERS OF MICROPROCESSOR DEFENCE ON INCREASE OF CURRENT

Defense of contact network of direct-current plays a large role providing of reliable work of power supply of railways. New microprocessor defense of feeders of contact network of direct-current plug in itself a few independent defense. For tuning of defense on the increase of current not walked around to define parameters which are independence between itself. Therefore a setpoint for this defense can reach in a few cycles by the selection of coefficients and however in the process of exploitation there is a necessity of further clarification.

The purpose of work consists in determination of necessary parameters for tuning of defense on the increase of current by a simple in practice calculation, but in also time suffices exact. It is routine in the article, that accepting time of measuring of current multiple permanent time of chain of short circuit it is possible to simplify calculations and define all of parameters for tuning of microprocessor defense.

Keywords: traction network, relay defense, microprocessor, direct current, fast-acting switch, current protection.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

СТАТИСТИКА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ПРОХОДНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Введение

Неотъемлемым элементом любого высоковольтного подстанционного оборудования закрытого типа являются проходные изоляторы. Они используются для изоляции и ввода токоведущих частей в закрытые РУ (распределительные высоковольтные устройства) электрических подстанций и станций от воздушных линий, а так же для соединения с открытыми высоковольтными распределительными устройствами [1]. От надежной работы проходных изоляторов напрямую зависит непрерывная работа подстанции в целом.

Основная часть

В энергосистемах Украины в работе находятся более 110000 единиц распределительных высоковольтных устройств, электрических подстанций и станций класса 6-10 кВ и 3000 единиц класса 35-110 кВ, 35-150 кВ, где эксплуатируются проходные изоляторы на напряжения 6-35 кВ. Распределение трансформаторных подстанций по различным электрическим предприятиям приведено в табл. 1.

Нетрудно оценить по данным табл. 1, что в электросетях Украины на сегодня эксплуатируются не менее одного миллиона штук проходных изоляторов класса 6-35кВ. Также активно применяются проходные изоляторы на подстанциях и пунктах группировки электрифицированной железной дороги. Рассвет строительства станций и подстанций приходился на 50-е – 70-е годы прошлого века.

До 2011 года в электросистемах Украины использовались исключительно керамические проходные изоляторы типов ИП, ИПУ на напряжения 6-35 кВ. Срок службы, заявляемый производителем, изоляторов проходных керамических на напряжения 10-35 кВ не более 30 лет. Можно принять, что по состоянию на 2014 год ресурс данного вида продукции выработан более чем на 90 %.

Опыт эксплуатации фарфоровых проходных изоляторов последних лет, изготавливаемых, как правило, мелкосерийными партиями, показывает на их низкую эксплуатационную надежность продукции. Это связано, скорее всего, с неудовлетворительным качеством фарфорового

элемента изолятора, обусловленным нарушением технологического регламента производства, не обоснованным уменьшением энергозатрат.

Таблица 1

Количество трансформаторных подстанций в электросетях Украины

Электроэнергетические компании Украины	ТП 6-10 кВ	ТП 35-150 кВ
ОАО «АК Винницаоблэнерго»	10143	191
ОАО «ЕК Житомироблэнерго»	8779	193
ОАО «ЕК Закарпатьеоблэнерго»	5401	231
АК «Киевэнерго»	193	61
ОАО «Николаевоблэнерго»	Нет данных	
ОАО «Прикарпатьеоблэнерго»	Нет данных	
ОАО «Сумыоблэнерго»	7332	179
АК «Харьковоблэнерго»	10707	288
ОАО «ЕК Хмельницкоблэнерго»	7250	174
ОАО «ЕК Черниговоблэнерго»	8 648	
ОАО «ЕК «Херсоноблэнерго»	~ 3000	217
ОАО «Львовоблэнерго»	8518	213
ОАО «Полтаваоблэнерго»	9950	206
ОАО «Запорожьеоблэнерго»	8236	266
ОАО «ЕК Черновцыоблэнерго»	3150	72
ОАО «Одессаоблэнерго»	8591	273
ПАО «ДТЭК Донецкоблэнерго»	~ 12000	369

Особо опасной зоной эксплуатации являются предприятия «Укрзалізниці» с оборудованием на фазное напряжение 27,5 кВ. На указанные участки электрифицированных железных дорог устанавливаются изоляторы типа ИПУ-35/1000-7,5 на фазное напряжение 21 кВ. В качестве примера можно привести данные опроса двух организаций, приобретших керамические проходные изоляторы производства после 2010 года выпуска. Для пополнения аварийного запаса проходных изоляторов ЭЧ-1 Львовской железной дороги были приобретены 20 изоляторов ИПУ-35/1000-7,5. В течение двух лет износ подконтрольных изоляторов составил 100 % и все они были сняты с мест эксплуатации. В 2012 году закончена реконструкция станции Лозовая, где были установлены на пункте группировки современные фидерные ячейки, укомплектованные керамическими проходными изоляторами. После года эксплуатации у двух керамических проходных изоляторах наблюдались интенсивные внутренние частичные разряды при номинальном напряжении, что свидетельствует о

повреждении фарфоровой изоляции до критических размеров - изоляторы подлежали замене. Основными причинами отказа керамических проходных изоляторов являются механическое растрескивание и разрушение фарфоровой части изолятора до видимых размеров, что также создает условие возникновения интенсивных частичных разрядов в теле диэлектрика.

Исследования термоупругих состояний в проходном изоляторе [2] показывают, что в случае перегрева токопровода, например, токами короткого замыкания внешний слой фарфора, подвергается окружным растягивающим напряжением, хотя величина его значительно ниже предельного для данного материала значения. Тем не менее, в работе [2] отмечается, что термоупругие напряжения могут играть решающую роль в разрушении фарфора в том случае, если в его теле присутствуют микротрещины с некоторой критической протяженностью. Согласно теории механическое повреждение твердого тела рассматривается как процесс возникновения хотя бы одной трещины и ее распространения, при котором образуются новые поверхности, разделяющие материала на части. Условие развития трещины можно оценивать соотношением Гриффитса [3]:

$$\lambda_{\text{мин}} \geq \frac{2\omega E}{\pi\sigma_{\text{ср}}^2},$$

где $\lambda_{\text{мин}}$ – минимальная начальная глубина трещины;

ω – удельная поверхностная энергия разрыва всех связей в поперечном сечении (коэффициент поверхностного натяжения материала);

$\sigma_{\text{ср}}$ – среднее напряжение растяжения в окрестности трещины.

Расчеты показывают, что при тех значениях термоупругих напряжений, что обуславливается с перегревом токопровода, критическая длина трещины составляет порядка несколько сотен микронов. Размеры микропор в керамических материалах, как правило, не превышают 10 мкм. Более крупные, протяженные дефекты могут возникать в материале как следствие слияния мелких пор в процессе изготовления, если имеет место отклонения от технологического регламента или под влиянием случайных внешних факторов. При нарушении технологии обжига количество нерасстворенных кристаллитов кварца может существенно увеличиться, что приводит к образованию внутренних напряжений и соответствующих микротрещин, величина которых определяется размерам кристаллитов кварца. Это происходит в

результате резкого изменения объема изделия при охлаждении его в печи. Таким образом, вероятность появления относительно крупных трещин порядка 100 и более микрон для хрупких керамических материалов всегда существует, поэтому нельзя исключить процесс постепенного разрушения рассматриваемого изолятора под воздействием статических и кратковременных термоупругих растягивающих напряжений.

В последние годы отмечается активное использование полимерных проходных изоляторов взамен фарфоровых (рис.1).

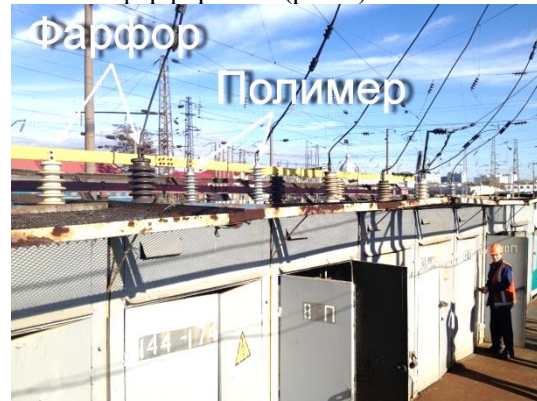


Рис. 1. Пункт группировки станции Львов, укомплектованный керамическими и полимерными проходными изоляторами

Предпосылками разработки полимерных проходных изоляторов являлись многолетний положительный опыт эксплуатации линейных и подстанционных изоляторов; использование нехрупких полимерных материалов в качестве изоляции и применение не энергоемкой технологии производства продукции. Освоение указанных материалов и технологии позволило создать конструкции полимерных проходных изоляторов с очевидными преимуществами:

- устойчивость применяемых материалов к резкому перепаду температур в диапазоне от -60 °C до +120 °C без изменения их свойств;
- устойчивость к статическим, динамическим и ударным нагрузкам;
- отсутствие хрупкого разрушения (в том числе и при транспортировке);
- гидрофобность поверхности защитной оболочки, отсюда способность поверхности изоляции к самоочистке (не требует обслуживания в процессе эксплуатации);
- низкие энергозатраты на единицу продукции;
- значительно меньшая масса.

В настоящее время известны зарубежные фирмы, изготавливающие полимерные проходных изоляторов (вводов): C-K Composites, Hoescht Ceram Tech, Kuvag Kunststoffverarbeitungs, Lapp Insulator Company, Mekufa, Raychem,

Sediver, GEC Henley, Isola Werke, Georg Jordan и MWB High Voltage Systems, Reuel, НПО Изолятор, Энергия-21, ЮИК и другие.

Вместе с тем, как показывает опыт эксплуатации полимерных проходных изоляторов первых разработок в России и в Украине, отмечаются ранние отказы изоляторов класса 35 кВ по причине электрического пробоя. Обследовани- ем поврежденных изоляторов, а также лабора- торными исследованиями было установлено, что имеет место электрическое старение изоля- ции на самом напряженном промежутке изоля- ции: токопровод – фланец, что обусловлено протеканием частичных разрядов (рис. 2).



Рис. 2. Полимерный проходной изолятор, вышедший из строя по причине электрического старения изоляции

Как известно [4], срок службы изоляции оценивается степенной функцией от максимальной напряженности электрического поля в диэлектрике

$$\tau = AE^{-n},$$

где $n = 5 \div 7$ при переменном токе промышленной частоты.

Поэтому очень важно, с одной стороны, усовершенствовать конструкцию изолятора с целью оптимизации интегрального распределения поля в наиболее уязвимом участке изоляции, с другой стороны, изучить всевозможные технологических факторы, которые могут привести к образованию локальных электрически напряженных очагов в теле изоляции с тем, чтобы минимизировать их в процессе изготовления. Также первостепенное значение приобретает проблемы разработки новых специфических методов контроля и введения в объем обязательных испытаний при оценке продукции в заводских и полевых условиях.

Не смотря на конструктивные и технологические ошибки при производстве первых партий проходных полимерных изоляторов, эта

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 8024-90. Аппараты и электротехниче- ские устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.
- Ким Е. Д. Оценка термоупругих напряжений

продукция получает в Украине последние годы все большее распространение (рис. 3).

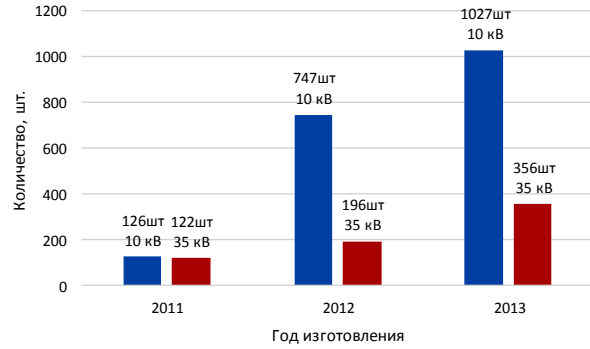


Рис. 3. Применение полимерных проходных изоля- торов в Украине производства ООО «Славэнергопром»

В заключение коротко об экономической эф- фективности от использования полимерных проходных изоляторов. 3-4 года назад стоимость полимерных проходных изоляторов была суще- ственно выше стоимости керамических изолято- ров, и экономическая эффективность обосновы- валась экономией на транспортных, монтажных и эксплуатационных расходах. Экономически оправданным было применение полимерных проходных изоляторов на оборудовании напря- жением 35 кВ. Сегодня стоимость полимерного изолятора равна или даже ниже стоимости кера- мических изоляторов. Это несомненно должно стимулировать преимущественное распростра- нение проходных полимерных изоляторов.

Выводы

Проведя анализ узкого сегмента электроизо- ляционного оборудования – проходных изоля- торов на напряжения 10, 35 кВ, можно сделать заключение, что данный класс изоляторов выра- ботал ресурс эксплуатации и подлежит замене. Современные проходные фарфоровые изолято- ры не полностью удовлетворяют требованиям по надежности. Исходя из этого разработана но- вая конструкция проходных изоляторов с при- менением полимерных материалов, которая в ближайшее время может стать полноценной за- меной классических проходных изоляторов из фарфора в энергосистеме Украины.

REFERENCES

- GOST 8024-90 *Apparaty i elektrotehnicheskie ustroystva peremennogo toka na napryazhenie vishe 1000 V. Normy nagreva pri prodolgitelnom regime raboty i metody ispitaniy.* [Apparatus and electrical devices AC voltage of 1000 V. Heating norms at continu-

в фарфоровом проходном ізоляторі // Енергетика та електрифікація. - 2012. - №2. - С. 45-48.

3. Дж. Гордон. Конструкції, или почему не ломаются вещи. 1978

4. Техніка високих напруг / Под ред. М.В. Костенко. – М.: «Висша школа», 1973. – 528 с.

Поступила в печать 17.09.2014.

Ключевые слова: полимерный изолятор, эксплуатация, пробой, термоупругие свойства, разрушение.

ous operation and test methods]

2. Kim E.D. *Ocenka termoprugih napyageniy v farforovom prohodnom izolyatore* [Evaluation of thermo elastic stresses in a porcelain bushing] / *Energetika I Elektrifikaciya* [Energetics and electrification], 2012, no.2, pp. 45-48.

3. *J. Gordon Konstrukcii, ili pochemu ne lomayutsa veshi.* [Design, or why things do not break], 1978.

4. *Tehnika visokih napyageniy.* [High Voltage Equipment] *Pod red. M.V. Kostenko* [Edition M. V. Kostenko], Moscow, High school publ., 1973, 528 p.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

Безопасность поставок электроэнергии потребителя зависит от надежной работы электрического оборудования в том числе и изоляционных конструкций. В последние года стал остро вопрос о замене проходных изоляторов в энергосистеме Украины, в связи с выработкой ресурса данного типа продукции. В настоящее время возможна замена на новые фарфоровые проходные изоляторы или их аналоги. В связи с интенсивным развитием полимерных материалов и технологий их переработки, закономерно стал вопрос о реализации достижений полимерной промышленности в разработке проходных изоляторов на напряжения 10-35 кВ. В настоящей статье рассмотрены вопросы опыта эксплуатации фарфоровых проходных изоляторов находящихся в эксплуатации, и групп подконтрольных фарфоровых и полимерных изоляторов установленных с 2010 года. Описаны основные достоинства и недостатки фарфоровых и полимерных высоковольтных проходных изоляторов. Обозначены перспективы развития проходных изоляторов из полимерных материалов.

УДК 621.315

Д. Г. КАРЮК (ТОВ «СЛАВЕНЕРГОПРОМ»)

Товариство з обмеженою відповідальністю «Славенергопром», вул. Шевченко, 49, Слов'янськ, Україна, 84122, karuk1979@gmail.com

СТАТИСТИКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ПРОХІДНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Безпека поставок електроенергії споживачам залежить від надійної роботи електричного обладнання в тому числі і ізоляційних конструкцій. В останні роки стало гостро питання про заміну прохідних ізоляторів в енергосистемі України, у зв'язку з виробленням ресурсу даного типу продукції. В даний час можлива заміна на нові фарфорові прохідні ізолятори або їх аналоги. У зв'язку з інтенсивним розвитком полімерних матеріалів і технологій їх переробки, закономерно стало питання про реалізацію досягнень полімерної промисловості в розробці прохідних ізоляторів на напруги 10-35 кВ. У цій статті розглянуті питання досвіду експлуатації порцелянових прохідних ізоляторів які перебувають в експлуатації, і груп підконтрольних порцелянових і полімерних ізоляторів встановлених після 2010 року. Описано основні переваги та недоліки фарфорових і полімерних високовольтних прохідних ізоляторів. Позначені перспективи розвитку прохідних ізоляторів з полімерних матеріалів.

Ключові слова: полимерный изолятор, эксплуатация, пробой, термопружні властивості, руйнування.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.315

D. G. KARYUK (LLC «SLAVENERGOPROM»)

Limited Liability Company «Slavenergoprom», st. Shevchenko, 49, Slavyansk, Ukraine, 84122, karuk1979@gmail.com

OPERATING STATISTICS HIGH-VOLTAGE ANADROMOUS INSULATORS

Security of supply of electricity of consumers depends on the reliable operation of electrical equipment including insulating construction. The question of replacing the bushings insulators in the power system of Ukraine recently strictly appeared, because of output of this type of products. Nowadays replacement is possible into new porcelain bushings insulators or their analogues. In connection with the intensive development of polymeric materials and technologies to process them, naturally became a question of implementation of the achievements of the polymer industry in the development of the bushing insulators 10-35 kV. This article describes the operating experience of porcelain bushings in service, and groups controlled porcelain and polymer insulators installed in 2010. The basic advantages and disadvantages of porcelain and polymeric high voltage bushings have been described. Perspectives of development of bushings made from polymeric materials have been identified.

Keywords: polymeric insulator, maintenance, breakdown, thermo elastic properties, destruction.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Карюк Д. Г., 2014

Е. Д. КИМ (НИИВН)

Научно-исследовательский институт высоких напряжений, ул. Генерала Батюка, 22, г. Славянск, Донецкая обл., Украина, 84121, эл. почта: ykim@meta.ua

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЗАКАЛКИ СТЕКЛОДЕТАЛЕЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Введение

История применения изоляторов из закаленного стекла уходит в далекие 50-ые годы прошлого столетия. Благодаря их уникальным качествам «само идентифицировать» в случае повреждения диэлектрика, но при этом сохранять механическую прочность конструкции стеклянные изоляторы наиболее массово эксплуатируются в воздушных сетях высокого напряжения. Несмотря на то, что последние годы отмечается широкое использование полимерных изоляторов в строительстве воздушных сетей, но все же на ВЛ 330 кВ и выше изолирующим элементом остаются стеклянные изоляторы. Спрос на стеклянные изоляторы не снижается, создаются новые производители данной продукции. В связи с этим острота конкурентной борьбы между компаниями – изготовителями сохраняется, что вынуждает искать пути снижения удельных затрат и повышения технических характеристик изделий. Разрабатываются новые более технологичные составы стекол, приемы закалки, сборки изоляторов, методы контроля и т.д.

В настоящей работе рассматривается одна из задач контроля качества закалки стеклодеталей в условиях массового производства. Дело в том, что стеклянный элемент несет на себе наибольшую нагрузку: это комплекс механических и электрических напряжений в сочетании с климатическими воздействиями, поэтому надежность и долговечность работы изоляции ВЛ практически определяется состоянием стекла в конструкции изолятора. Вместе с тем нужно констатировать, что методы, приемлемые для количественной характеристики устойчивости элементов из стекла пока что в открытой публикации не предложены. Регламентировано в ГОСТ [1] качество стеклодетали оценивать визуально по внешнему виду поверхностного слоя стекла, по наличию различного рода дефектов. По-видимому, задачи более объективного выходного контроля качества изоляционной детали решаются в каждом производстве обособленно, основываясь на своем опыте и располагаемой информации.

В последнее время создаются малые предприятия по сборке изоляторов на купленных извне составных элементах, в том числе, стеклодеталей. Для таких предприятий также остается открытым вопрос количественного определения качества приобретаемых изделий на основе общепринятых методов и критериев приемки.

Методы точечного измерения закалочных напряжений

Сущность закалки стеклоизделия заключается:

- в нагреве до температуры, при которой оно переходит в пластическое состояние, но при этом не изменяет своей первоначальной формы и размеров;

- в резком охлаждении воздушным потоком в течение нескольких минут.

В результате такой термической обработки изделия создаются (рис. 1):

- напряжения растяжения во внутренних слоях (+);

- напряжения сжатия в наружных слоях (-).

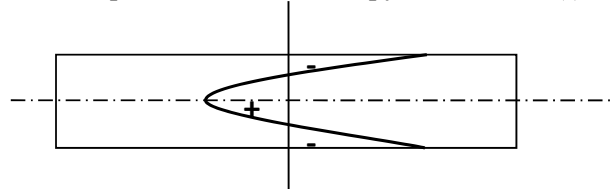


Рис. 1. Распределение закалочного напряжения в стекле

При изгибе напряжение сжатия в поверхностном слое «компенсирует» воздействующее напряжение растяжения. Кроме того предельное напряжение стекла на сжатие на порядок превышает предельную прочность при растяжении. Эти два обстоятельства обуславливают упрочнение закаленного стеклоизделия в несколько крат.

Суть метода измерения закалочного или остаточного напряжения в твердом теле состоит в фиксации упругого перемещения в исследуемой локальной области, обусловленного наличием остаточного сжимающего напряжения. Применяются два способа реализации

непосредственного измерения. Первый - создается несквозное отверстие на интересующей поверхности и измеряется деформация в окрестности отверстия, в простейшем случае, с помощью тензодатчиков [2]. Второй – сопоставлением микрорельефов (голограмм) окрестности будущей лунки на поверхности объекта в исходном состоянии и после высверливания или травления малой лунки [3]. Для этой цели используются лазерная и компьютерная технология. В результате наложения голограмм или цифровой фотографии при их одновременном восстановлении упругие перемещения поверхности в окрестности лунки выявляются в виде интерферограммы или спекл-интерферограмм, которые расшифровываются по разработанной схеме. Методы, основанные на точечном механическом воздействии исследуемой поверхности, являются универсальными, что позволяет установить искомые напряжения в данной локальной области в абсолютных единицах измерения. Вместе с тем нетрудно убедиться, что они малопригодны, когда дело касается массового производства.

Метод измерения двойного лучепреломления

Стекло с остаточными напряжениями обладает свойством двойного лучепреломления, что может быть обнаружено с помощью полярископов [4]. Линейно поляризованный луч, проходящий через стекло с остаточными напряжениями, распадается на два луча (рис. 2): обыкновенный *o* и необыкновенный *e* с собственными показателями преломления: n_o и n_n .

Оба луча в стекле распространяются с различной скоростью, приобретая некоторую разность хода. Величина двойного лучепреломления определяется разностью между показателями преломления Δn обыкновенного и необыкновенного лучей или разностью хода Δ , выраженной в нанометрах и отнесенной к толщине образца стекла в 1 см:

$$\Delta n = n_o - n_e = \frac{\Delta}{l}$$

Таким образом, двойное лучепреломление характеризует степень однородности стекла по показателю преломления. При известной величине разности хода лучей определяется по табличным данным средневзвешенное напряжение в рассматриваемом участке стекла. Метод оценки напряжения в стекле, основанный на измерении разности хода лучей детально описан в ГОСТ 3591 -91 [5]. Как показывает практика,

данный метод эффективен для контроля изделий с плоско - параллельными поверхностями. В случае с криволинейными поверхностями, как правило, ограничиваются упрощенными критериями оценки степени термообработки стекла по цветным картинам интерференционных полос на экране анализатора полярископа.

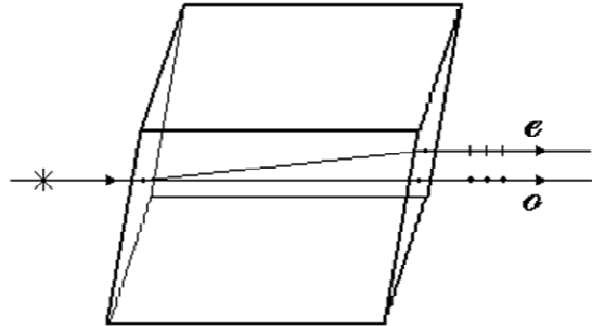


Рис. 2. Двойное лучепреломление

Ударная прочность как параметр контроля качества стеклодеталей

Идея заключается в установлении статистической корреляции между ударной прочностью стеклодеталей и прочностью на растяжение самих изоляторов, изготовленных с использованием деталей данной совокупности – партии. Под ударной прочностью понимается устойчивость стеклодеталей к внешнему динамическому воздействию. Ударная прочность стеклодеталей определяется следующим образом. Испытуемая деталь устанавливается горизонтально головкой вниз, при этом только тарелка ложится на жесткую поверхность, как показано на рис. 3.

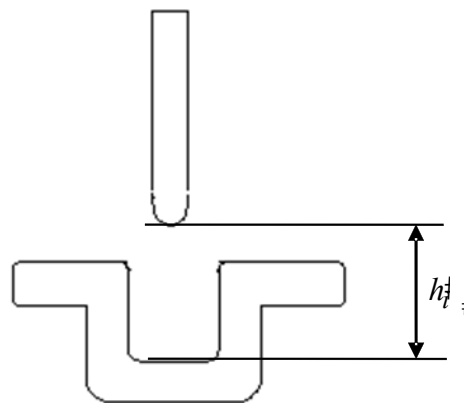


Рис. 3. Схема испытания на ударную прочность детали

Боек представляет собой металлический цилиндр с массой m_0 со сферическим наконечником и может падать практически свободно с фиксированной высоты на поверхности головки стеклодетали. Тогда параметром, характери-

зующим устойчивость i – того изделия принимается минимальная высота бойка h_i , при которой оно разрушается. Основное требование к установке, на котором проводятся испытания – это отсутствие видимой деформации в момент соударения бойка со стеклом.

Из накопленного опыта установлено, что:

- критическая высота, при которой разрушается испытуемый объект, не зависит от предшествующих ударных воздействий;
- статистика параметра h_i одной совокупности изделия хорошо согласуется с нормальным законом распределения случайных величин.

Как известно, характер разрушения изоляторов при испытании на растяжение неоднороден: кроме разрушения стеклодеталей имеет место отрыв стержня или шапки; в редких случаях, сползание стержня или шапки. Для корректности решения рассматриваемой задачи необходимо испытывать стеклодетали в конструкции изолятора с упрочненной арматурой, что исключает разрушение металлических элементов. В этом случае можно показать, что распределение разрушающей силы p_i изолятора хорошо аппроксимируются нормальным законом.

Нормирование ударной прочности стеклодеталей

Пусть мы располагаем результатами испытаний на ударную прочность стеклодеталей $h_i (i = 1, 2..n)$, случайно отобранных из одной генеральной совокупности – партии, и на механическую прочность соответствующих изоляторов $p_j (j = 1, 2..m)$, собранных из этих деталей с упрочненной арматурой.

Требуется установить предельную границу ударной прочности стеклодеталей h_H , соответствующих номинальной прочности изоляторов $p_j > P_H$.

Воспользуемся известными математическими приемами при оценке статистических характеристик случайных величин, распределенных по нормальному закону. Для некоторой случайной величины a_i в качестве оценки результатов опыта приняты среднееарифметическое значение \bar{a} и среднеквадратическое отклонение S_a при n измерений – выборки:

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}; \quad (1)$$

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum (\bar{a} - a_i)^2}{n-1}}. \quad (2)$$

При $n \rightarrow \infty$ среднееарифметическое значение (1) стремится к своему математическому ожиданию $\bar{a} \rightarrow \mu_a$; среднеквадратическое отклонение (2) к стандарту отклонения: $S_a \rightarrow \sigma_a$. Предельные характеристики случайных величин с заданной доверительной вероятностью F_D можно оценить по следующим соотношениям:

$$\mu_a = \bar{a} \mp \frac{S_a}{\sqrt{n}} \cdot t_a; \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{n-1} \cdot S_a}{\chi_{2a}^2} < \sigma_a < \frac{\sqrt{n-1} \cdot S_a}{\chi_{1a}^2}, \quad (4)$$

где $t_a, \chi_{1a}^2, \chi_{2a}^2$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона [6].

Принимаем рабочую гипотезу о том, что функции распределения случайных величин: ударной прочности стеклодеталей F_{cm} и механической прочности изоляторов F_{uz} , собранных из этих стеклодеталей эквивалентны между собою, т.е.

$$F_{cm}(h_i) \cong F_{uz}(p_j). \quad (5)$$

Тогда можно принять, что относительные объемы изделий, не соответствующих нормированным значениям, также примерно равны друг с другом

$$F_{cm}(0 < h_i \leq h_H) \cong F_{uz}(0 < p_j \leq P_H). \quad (6)$$

Для вычисления вероятностей нахождения случайных величин в заданных интервалах (6) воспользуемся функцией Лапласа

$$\Phi\left(\frac{h_H - \mu_h}{\sigma_h}\right) \cong \Phi\left(\frac{P_H - \mu_p}{\sigma_p}\right), \quad (7)$$

где аргументы функций определяются с помощью вышеприведенных формул (1) - (4).

Тогда из (7) получаем выражение для нижней границы ударной прочности стеклодеталей с надежностью F_D ,

$$h_H \geq \bar{\mu}_h + \bar{\sigma}_h \frac{P_H - \mu_{мин.п}}{\sigma_{мак.п}}. \quad (8)$$

Здесь для искомой ударной прочности принимаем средние значения математического ожидания (3) и стандарта отклонения (4)

$$\bar{\mu}_h = \bar{h}; \quad \bar{\sigma}_h = \frac{\sqrt{n-1} \cdot S_a}{2} \left(\frac{1}{\chi_{2a}^2} + \frac{1}{\chi_{1a}^2} \right),$$

а для прочности изоляторов - наиболее пессимистическое сочетание: минимальное значение математического ожидания (3) и максимальный стандарт отклонения (4). Таким образом, получаемая согласно (8) величина h_n устанавливает нижний порог ударной прочности стеклодеталей.

Пример расчета

Выполним статистический анализ данных испытаний двух разных совокупностей - партий А и Б стеклодеталей ($m_6 = 1290$ гр – масса бойка) и соответствующих изоляторов класса $P_n = 120$ кН одного из производителей стеклянных изоляторов (табл. 1 - 4).

Определяем числовые характеристики по результатам испытаний партии А.

Для стеклодеталей имеем:

$n = 31$ – количество выборок;

$t_h = 2,048, \chi_{1h}^2 = 44,46, \chi_{2h}^2 = 15,3$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответ-

ственно, для $n = 31$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\bar{\mu}_h = 532$ мм — среднее математическое ожидание (среднеарифметическая величина) прочности стеклодеталей;

$\bar{\sigma}_h = 32,1$ мм – средний стандарт отклонение выборки;

Для изоляторов имеем:

$m = 32$ – количество выборок;

$t_p = 2,04, \chi_{1p}^2 = 17,54$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответственно, для $m = 32$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\mu_{\text{мин.р}} = 131$ кН – минимальное математическое ожидание прочности изолятора;

$\sigma_{\text{макс.р}} = 2,25$ кН – максимальный стандарт отклонения.

Подставляем эти значения в (8), получаем нижнюю граничную ударную прочность стеклодеталей, обеспечивающих нормированную прочность изоляторов

$$h_n \geq 532 + 32,1 \frac{120 - 131}{2,25} = 375 \text{ мм.}$$

Аналогичную расчетную процедуру выполним для продукции партии Б, результаты испытаний которых приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 1

Результаты испытания стеклодеталей на ударную прочность, h_i , мм (партия А)

450	475	500	350	750	725	575	625	525	500	825	700	600	400	375
300	400	575	425	425	750	500	425	725	525	475	500	625	600	

Таблица 2

Результаты испытания изоляторов на растяжение, p_j , кН (партия А)

133	126	139	127	134	131	128	143	134	140	146	145	116	136	131	130
125	133	137	132	147	136	133	131	135	134	130	128	149	141	136	127

Таблица 3

Результаты испытания стеклодеталей на ударную прочность, h_i мм (партия Б)

325	350	325	325	425	525	350	400	350	400	325	350	400	350	425	525
350	400	425	400	400	450	700	400	350	600	350	350	300	300	350	400
350	350	350	350	300	300	600	500	400	350	450	500	500	400	800	400
450	400	300	450	400	450	350									

Таблица 4

Результаты испытания изоляторов на растяжение, p_j , кН (партия Б)

140	88	100	113	100	129	139	89	121	135	105	121	128	136	118	136
118	126	112	105	122	116	130	103	121	131	118	110	80	120	96	128
136	115	129	145	112	102	128	101	131	137						

Статистические параметры для стеклодеталей:

$n = 51$ – количество выборок;

$t_h = 2,0$; $\chi_{1h}^2 = 71,42$; $\chi_{2h}^2 = 32,36$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответственно, для $n = 55$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\bar{\mu}_h = 401$ мм – среднее математическое ожидание прочности стеклодеталей (среднеарифметическая величина);

$\bar{\sigma}_h = 17,9$ мм – средний стандарт отклонение выборки.

Для изоляторов имеем:

$m = 42$ – количество выборок;

$t_p = 2,02$; $\chi_{1p}^2 = 25,21$ – коэффициенты Стьюдента и Пирсона, соответственно, для $m = 42$ и доверительной вероятности $F_d = 0,95$;

$\mu_{\text{мин.р}} = 113$ кН – минимальное математическое ожидание прочности изолятора;

$\sigma_{\text{макс.р}} = 3,96$ кН – максимальный стандарт отклонения.

Подставляем в соотношение (8), получаем

$$h_H \geq 401 + 17,9 \frac{120 - 113}{3,96} = 433 \text{ мм.}$$

Сравнивая результаты испытаний изоляторов двух партии (см. табл. 2 и 4) можно отметить,

что они существенно отличаются между собой. Изоляторы партии А характеризовались высокой прочностью, $p_j > P_H = 120$ кН, когда как для партии Б из 51 шт. испытанных изоляторов 20 шт. разрушились при нагрузке ниже нормированной величины. Несмотря на значительную разницу в качествах изделий двух партий предложенная методика приводит к достаточно близким для практики нормированным значениям ударной прочности стеклодеталей.

Выводы

Приведен алгоритм определения нормированного значения h_H ударной прочности для оценки качества закалки стеклодеталей в условиях массового производства.

2. Существование непосредственной корреляции между ударной прочностью стеклодеталей и механической прочностью изоляторов показано на примерах статистического анализа данных испытаний двух партий изоляторов одного и того же типа, но с существенно отличающимися прочными характеристиками.

3. Рекомендуется нормировать ударную прочность стеклодеталей и ввести метод испытания в соответствующий стандарт по техническим требованиям составных элементов изолятора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 18328-73. Изоляторы стеклянные линейные подвесные и штыревые. Требования к качеству стекла и поверхности изоляционных деталей.
- Чернышев Г. Н. Остаточные напряжения в деформированных твердых телах / Г.Н. Чернышев, А. Л. Попов, В. М. Козинцев, И. И. Пономарев. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 240 с.
- Гусев М. Е. Методы цифровой голографической интерферометрии и их применение для измерения наноперемещений / М. Е. Гусев, А. А. Воронин, В. С. Гуревич, А. М. Исаев, И. В. Алексеенко, В. И. Редкоречев. – Наносистемы: Физика Химия Математика. – 2011. – № 2. – С. 23-39.
- Измерение двойного лучепреломления оптических стекол [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v20493/>
- ГОСТ 3519-91 Материалы оптические. Методы определения двулучепреломления
- Чернова Н. И. Математическая статистика: Учеб. пособие / Н. И. Чернова. – Новосибирск.: Новосибир. гос. ун-т., 2007. – 148 с.

Поступила в печать 20.08.2014.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

REFERENCES

- GOST 18328-73. *Izolyatory steklyannye lineinye podvesnye i shtyrevye*. [Glass linear suspension and insulators. The requirements to the quality of glass surface and insulating parts].
- Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., I.I. Ponomarev *Ostatochnye napryazheniya v deformirovannykh tverdykh telakh* [Residual stresses in deformed solid telah], M.: Nauka. Fizmatlit, 1996.-240 p.
- Gusev M.E., Voronin A.A., Gurevich V.S., Isaev A.M., Alekseenko I.V., Redkorechey V.I. *Metody tsifrovoy golograficheskoi interferometrii i ikh primeneniye dlya izmereniya nanoperemeshchenii* [Digital holographic interferometry methods and their application for measuring nanodisplacement], Nanosystems: Physics Chemistry Matematika, 2011, no. 2, pp. 23-39.
- Measurement of birefringence of optical glasses. Available at: <http://bib.convdocs.org/v20493/>
- GOST 3519-91. *Materialy opticheskie. Metody opredeleniya dvulucheprelomleniya* [Optical Materials. Methods for determination of birefringence].
- Chernova N. I. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical Statistics], Novosibirsk, Novosib. state. Univ., 2007, 148 p.

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

© Ким Е. Д., 2014

Стекланні ізолятори, завдяки унікальним властивостям «само ідентифікувати» в разі пошкодження діелектрика, але при цьому зберігати механічну міцність конструкції, отримали найбільш масове застосування в повітряних мережах високої напруги. Висока експлуатаційна надійність у поєднанні з ефектом самоконтролю обумовлюється закалюванням скляних деталей в процесі її виготовлення. Разом з тим контроль якості склодеталей обмежується візуальним оглядом поверхневого шару скла на предмет наявності різного роду дефектів. Існуючі методи визначення залишкової напруги в локальних крапках або оптичні методи малоефективні в умовах поточного виробництва.

Пропонується кількісна методика оцінки якості закалки склодеталей, заснована на статистичному аналізі прочностних характеристик деталей і кінцевої продукції - ізоляторів. Показано, що між стійкістю склодеталей до ударних дій і механічною міцністю ізоляторів існує статистична кореляція, яка може бути виражена на основі нормального закону розподілу випадкових величин. Рекомендується нормувати ударну міцність склодеталей і ввести з методом випробування у відповідний стандарт по технічних вимогах складових елементів ізолятора.

Ключові слова: скляний ізолятор, склодеталь, закалка, методи вимірювання залишкової напруги, ударна міцність, міцність на розтягнення, статистична кореляція, нормальний розподіл.

UDC 631.331.3

Є. Д. КИМ (НДІВН)

Науково-дослідний інститут високих напруг, вул. Генерала Батюка, 22, м. Слов'янськ, Донецька обл., Україна, 84121, ел. пошта: ykim@meta.ua

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЗАКАЛЮВАННЯ СКЛОДЕТАЛЕЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЛІНІЙНИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Скляні ізолятори, завдяки унікальним властивостям «само ідентифікувати» у разі пошкодження діелектрика, але при цьому зберігати механічну міцність конструкції, отримали найбільш масове застосування в повітряних мережах високої напруги. Висока експлуатаційна надійність у поєднанні з ефектом самоконтролю обумовлюється гартуванням скляних деталей в процесі її виготовлення. Разом з тим контроль якості склодеталей обмежується візуальним оглядом поверхневого шару скла на предмет наявності різного роду дефектів. Існуючі методи визначення залишкової напруги в локальних крапках або оптичні методи малоефективні в умовах поточного виробництва.

Пропонується кількісна методика оцінки якості гартування склодеталей, заснована на статистичному аналізі прочностних характеристик деталей і кінцевої продукції - ізоляторів. Показано, що між стійкістю склодеталей до ударних дій і механічною міцністю ізоляторів існує статистична кореляція, яка може бути виражена на основі нормального закону розподілу випадкових величин. Рекомендується нормувати ударну міцність склодеталей і ввести з методом випробування у відповідний стандарт по технічних вимогах складових елементів ізолятора.

Ключові слова: скляний ізолятор, склодеталь, гартування, методи вимірювання залишкової напруги, ударна міцність, міцність на розтягнення, статистична кореляція, нормальний розподіл.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол Є. І.*

UDC 631.331.3

Y. D. KIM (HVRI)

High Voltage Research Institute, General Batyuk St., 22, Slovyansk, Donetsk Region, Ukraine, 84121, e-mail: ykim@meta.ua

METHOD OF ASSESSING THE QUALITY OF TEMPERING OF THE GLASS PARTS OF THE HIGH VOLTAGE LINE INSULATORS

Glass insulators, that due to unique properties «self to identify» in the case of damage of dielectric, but here to save mechanical strength of construction, got the most application in the air high-voltage lines. High operating reliability in combination with the effect of self-control is caused by hardening of glass element in the process of its making. At the same time control of quality of glass element is limited to visual examination of superficial layer of glass for the purpose the presence of different sort of defects. The known methods of determination of residual tensions in local points or optical methods are ineffective in the conditions of mass production.

The quantitative method of estimation of quality of tempering of glass element, based on the statistical analysis of strength characteristics of details and eventual products - insulators is offered. It is shown that between stability of glass element to impact influences and mechanical strength of insulators there is statistical correlation which can be expressed on the basis of normal distribution of the random variables. It is recommended to normalize the impact strength of glass element and the test method in the relevant standard specifications for the constituent elements of the insulator to include.

Keywords: glass insulator, toughened glass element, methods of measuring of residual tension, impact strength, tensile strength, statistical correlation, normal distribution.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Sokol E. I.*

© Ким Е. Д., 2014

T. I. KIRILYUK (DNURT)

Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan,
Street Lazaryan, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: tanya_kir@bigmir.net

MODELING THE COEFFICIENT OF ENERGY LOSSES IN A CONTACT LINE BASED ON THE MONTE-CARLO METHOD

Introduction

The volume of energy losses in electric grids is a main indicator of efficiency of their work, visual status indicator system of power registration, efficiency of power supply organizations. This indicator clearly shows the problems that require emergency solutions in development, reconstruction and modernization of power networks, improved methods and tools for their operation and management in improving the accuracy of electricity metering, fundraising efficiency for electricity consumed.

The main part of energy losses is losses in contact line. The average losses in contact line is 10,84 %. The structure of energy losses in percentage of the total number of consumption electricity is different in Ukrainian Railways. There are 16 % in Donetska railway, 15,07 % in Prydniprovskaya railway, 11,44 % in South railway, 17,26 % in Lvivska railway, 5,06 % in Odeska railway, 6,53 % in South-West railway.

A number of trends that affect the level of energy losses in a contact line were emerged. These trends are outdated equipment, physical and moral wear of metering of electricity, discrepancy installed equipment power transmissible. This situation connects with small investment in development and modernization of electric networks, improvement of their control regimes in accounting electricity.

After all the problem of reducing losses in the power grids not only lost its relevance, but rather has become one of the objectives of financial stability.

As mentioned in previous publications [1-6], it is better to determine energy losses in the contact network based on the indirect method. This method is based on using meter of losses. This method is based on the register values of per square ampere-hours on the feeders of traction substations. The meter is located on the feeder. It measures values of per square ampere – hours in the unit of time and scales them to the energy losses using the energy losses coefficient.

The literature review

The indirect method for determining the energy losses in contact line was described in the works of V. D. Bardushko, O. L. Bykadorov, V. T. Do-

manskiy, M. E. Krestyanov, A. N. Kuvychynskiy, K. G. Marquardt, V. T. Cheremysin [7-15].

The comparison of two ways of measuring of energy losses in the contact network was done in [10]. They are developed by South railway with Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician Lazaryan (DIIT), and developed by Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)

First way (DIIT) is based on using meter of volts-hours. Second way (MIIT) is based on using meter of ampere-hours.

Calculation formula of the second method of measurement [10]:

$$\Delta W = k_l \cdot I_f^2 t, \quad (1)$$

where k_l – energy losses coefficient;

$I_f^2 t$ – sum of values of per square ampere-hours.

The South railway method has several disadvantages. They are measurement error is 10% and cannot be corrected by other coefficients; this method cannot be applied in areas of alternating current.

The most promising way to determine the energy losses in contact lines is using meter of losses which will register values of per square ampere-hours on the feeders of traction substations. These devices need individual settings for a particular feeder zone.

The value of the energy losses coefficient was defined in [11] by the next way:

$$k_l = \frac{r \cdot l}{1,94} \times \frac{\alpha \cdot \frac{N_0}{Nn} \sum_{p=1}^v \frac{W_{PT}^2 N}{N_p} + \frac{W_T^2 (n-1)(n^2 - n + 1)}{2,2n^3}}{\alpha \cdot \frac{N_0}{Nn} \sum_{p=1}^v \frac{W_{PT}^2 N}{N_p} + \frac{W_T^2 (n-1,33)}{1,4n}}, \quad (2)$$

where r – resistance of contact line;
 l – length of the section;

α – coefficient that depends on the time of current consumption by train;

N_0 – maximal throughput of the area;

N_n – maximal throughput of the area which are using;

ν – the number of types of trains;

W_T – energy consumption for traction;

n – the maximum possible in this area number of trains.

Boundaries of changing of the energy losses coefficient depend on the values of its constituent were investigated in [14]. They are changing of numbers of trains, changing the time of current consumption by train and changing in different types of trains. If numbers of trains change in 10 %, the energy losses coefficient changes no more than 0,5 %. If the time of current consumption by train changes in 15 – 20 %, the energy losses coefficient changes in 1 %. If number of different types of trains change, the energy losses coefficient changes no more than 0,5 % too.

Other parameters are practically constant values for a particular area. So energy losses coefficient can be determined for any area.

In [8] were determined energy losses in contact line and currents of feeders of traction substations by using schedules of trains and locomotives current curves for a large number of instant schemes. The energy losses were determined by the next formula

$$k_{li} = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta P_i}{\sum_{i=1}^m I_{fi}^2}, \quad (3)$$

where i – number of instant scheme;

m – numerosity of instant schemes.

According to schedules of values of energy losses coefficient was determined that:

1. We had constant value of energy losses coefficient;

2. The period of time during which the value is set 2.5 - 3 hours.

So it is possible to determine the energy losses coefficient in the contact line by measuring the square of feeder's current.

The energy losses coefficient determined in simulations. Results of traction calculations, parameters of power supply system and number of trains in the area were used like output data.

Opportunities of standing and overtaking freight and passenger trains in probabilistic schedule models were taken into account.

However, as shown by experiments, the rate of loss depends on the egalitarian current number of trains in the area and so on. As defined noticeable

error (7.5%) in this way. The error can be reduced in laying mechanism meter range previously estimated the energy losses coefficient. In [13] evaluated the impact on the value of equalized current of energy losses, which allowed make the following conclusions. There are equalizing currents have stronger influence on power loss than the less load on trains; depending on the ratio of traction load and equalized current power losses could grow by 1.5 – 12 times.

Error in determining the energy losses is significantly reduced by calculating the energy losses coefficient in real time. The solution of this problem is possible in the operation of the automatic control system of electricity.

Factor analysis of the energy losses coefficient was done in [10]. The energy losses coefficient was calculated on the simulation model only once for a particular feeder zone and after the entering to the meter isn't changed. Old electronic components were not allowed to adjust the energy losses coefficient by automated.

This way indirect method can be improved by taking into account factors that affect the energy losses in the contact line. These factors are the scheme of electric power supply of railway section, the wear (reduction of the area) of contact line, the number of trains on railway section, the environment temperature, speed and current of trains.

Formulation of the experiment on the railway is complex task. Therefore the research was carried out by simulation based on the Monte-Carlo method.

Formulation of the problem

Monte-Carlo method and simulation with using it is described in [16, 17]. Modeling for determining the character of changing of energy losses coefficient was done by using Crystal Ball program by the next way (fig. 1).

We have to set the output parameters and laws of distribution of variables for formation the model. Next experiments were done for these reasons.

The experiment area is described on the fig. 2.

Executed schedules of experimental area are studied for determining patterns of change speed and number of trains on areas between traction substations.

The average speed on the areas between traction substations was calculated on the base of these schedules (table 1).

The histogram of speed trains distribution on areas between traction substations of Odessa railway is shown in fig. 3. The calculations are made in the program Crystal Ball.

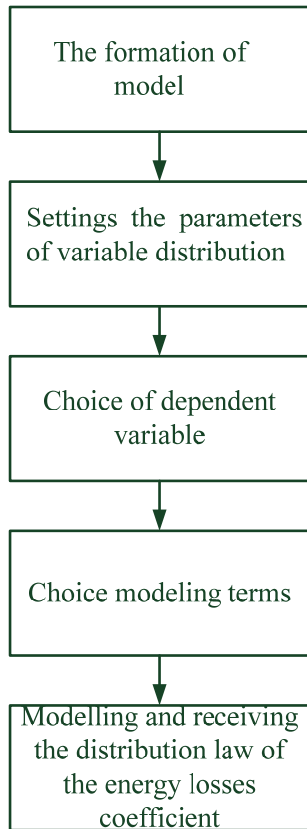


Fig. 1. Algorithm of simulation using Monte Carlo method in the Crystal Ball environment

According to the results of statistical studies found that the speed of trains on areas between traction substations obeys to lognormal distribution. The following characteristics of random variables the speed distribution of trains on areas between traction substations were received (table 2).

Let us analyze the executed schedules and calculate the number of trains on areas between traction substations A–K of Odessa railway (table 3) for a week in increments 1 hour.

The histogram of distribution numbers of trains on area between traction substations A K-of Odessa railway is shown in fig 4.

According to the results of statistical studies found that the numbers of trains on areas between traction substations obeys to binomial distribution. The following characteristics of numbers of trains on areas between traction substations were received (tab. 4).

Journals of contact line state for areas of Odessa railway were analyzed. The residual height of contact line was calculated. The average wear of contact line was determined by using tables [18] (fig. 5).

The histogram of wear of contact line distribution on areas between traction substations of Odessa railway is shown in fig. 6. The calculations are made in the program Crystal Ball.

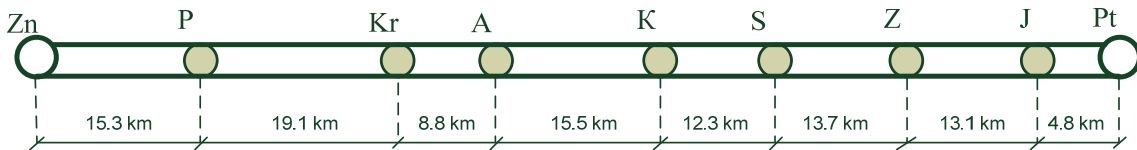


Fig. 2. Scheme of the region Zn – Pt of Odessa railway

Table 1

Fragment of average speed of trains on areas between traction substations of Odessa railway

№ train	Areas between traction substations							
	Zn-P	P-Kr	Kr-A	A-K	K-S	S-Z	Z-J	J-Pt
1	91.80	47.75	44.00	46.50	52.71	48.35	87.33	32.00
2	41.73	95.50	66.00	31.00	12.95	91.33	98.25	12.00
3	83.45	81.86	75.43	62.00	73.80	74.73	78.60	57.60
4	70.62	88.15	40.62	58.12	61.50	63.23	49.12	57.60
5	57.38	52.09	88.00	27.35	23.81	13.70	78.60	24.00
6	54.00	44.08	44.00	35.77	92.25	74.73	56.14	28.80
7	45.90	95.50	88.00	93.00	73.80	37.36	41.37	24.00
8	45.90	20.11	44.00	51.67	25.45	34.25	37.43	26.18
9	48.32	57.30	37.71	32.07	30.75	48.35	52.40	19.20
10	35.31	19.76	44.00	84.55	23.06	91.33	32.75	28.80
11	32.79	54.57	40.62	48.95	49.20	63.23	71.45	57.60
12	83.45	52.09	40.62	44.29	56.77	54.80	49.13	28.80
13	91.80	54.57	37.71	51.67	49.20	58.71	60.46	36.00

Characteristics of random variables the speed distribution of trains on areas between traction substations, km/h

Mathematical expectation, μ	Median Me	Mode Mo	Average square expectations, σ	Dispersion, D	Asymmetry γ_1	Excess γ_2	Coefficient of variation, V
49,87	48,32	45,27	21,24	451,29	0,44	3,36	0,42

Table 3

Number of trains on area between traction substations A–K of Odessa railway

Date	Time																							
	05.00-06.00	06.00-07.00	07.00-08.00	08.00-09.00	09.00-10.00	10.00-11.00	11.00-12.00	12.00-13.00	13.00-14.00	14.00-15.00	15.00-16.00	16.00-17.00	17.00-18.00	18.00-19.00	19.00-20.00	20.00-21.00	21.00-22.00	22.00-23.00	23.00-24.00	24.00-01.00	01.00-02.00	02.00-03.00	03.00-04.00	04.00-05.00
07	3	4	7	5	6	6	5	6	2	5	7	6	1	5	2	1	2	3	2	7	2	5	8	3
08	2	4	6	4	4	3	4	2	3	4	7	5	2	6	6	4	1	4	6	5	6	2	6	2
09	6	2	2	5	4	4	3	2	1	6	2	6	6	7	5	4	2	1	3	2	4	3	7	6
10	2	8	5	6	4	7	4	5	3	3	4	8	2	4	3	1	5	4	3	6	5	4	4	2
11	4	3	7	3	2	5	8	5	7	7	8	7	6	4	4	2	3	4	1	3	7	2	6	4
12	6	5	2	6	6	3	4	2	5	3	2	4	5	2	5	6	2	2	6	4	6	4	8	6
13	8	6	5	4	3	2	6	2	4	4	3	5	6	4	6	2	2	7	5	6	3	2	7	8

Table 4

Characteristics of numbers of trains on areas between traction substations

Mathematical expectation, μ	Median Me	Mode Mo	Average square expectations, σ	Dispersion, D	Asymmetry γ_1	Excess γ_2	Coefficient of variation, V
4,17	4,00	4,00	1,71	2,93	0,23	2,91	0,41

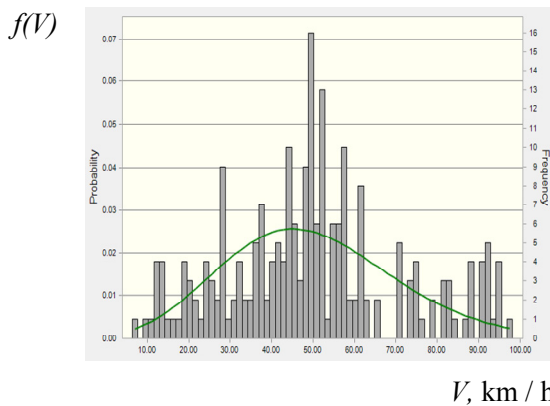


Fig. 3. The histogram of speed trains distribution on areas between traction substations of Odessa railway

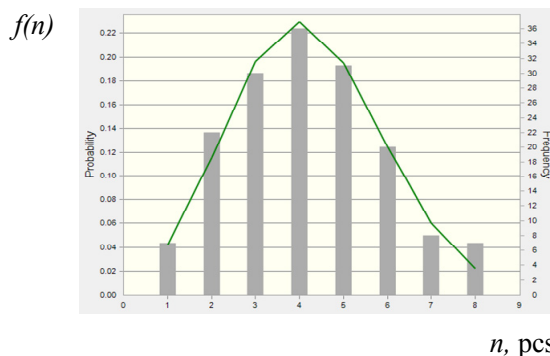


Fig. 4. The histogram of distribution numbers of trains on areas between traction substations of Odessa railway

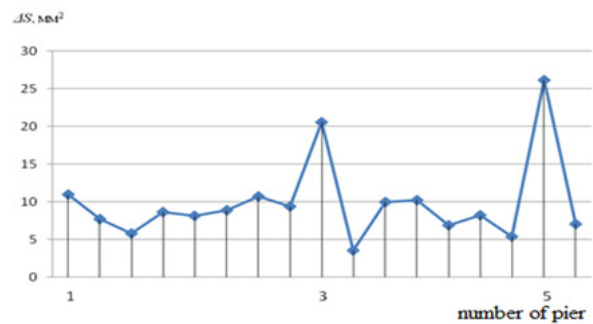


Fig. 5. The fragment of wear of contact line for Odessa railway area

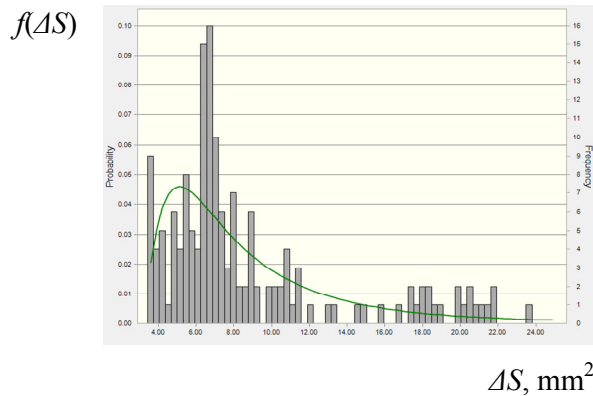


Fig. 6. The histogram of distribution wear of contact line on areas between traction substations of Odessa railway

According to the results of statistical studies found that the wear of contact line on areas between traction substations obeys to lognormal distribution. The following characteristics of wear of contact line on areas between traction substations were received (table 5).

Diary forecast for each day of the year were studied for research change of temperature on the areas of Odessa railway. Monthly average temperatures were calculated.

The histogram of temperature changes on areas of Odessa railway is shown in fig 7.

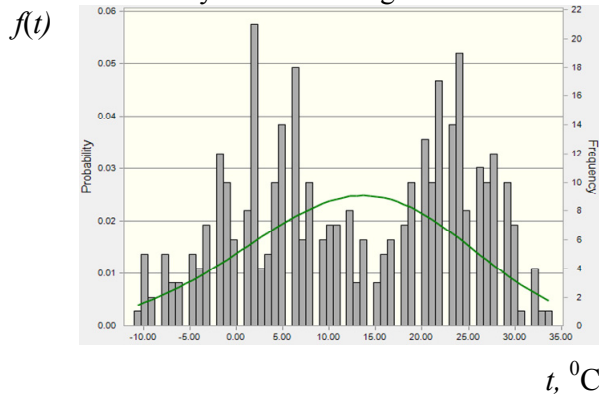


Fig. 7. The histogram of temperature changes on areas of Odessa railway

According to the results of statistical studies found that the temperature changes on areas of Odessa railway obeys to Weibull distribution. The following characteristics of temperature changes on areas of Odessa railway were received (table 6).

Summarizing the above results, we write the input data for modeling (table 7). The law of current distribution was found and described in [19].

For modeling we use the regression equation [6] to determine the rate of loss to alternating current area

$$k_l = 9.022 + 0.056n^2 - 0.72n + 0.024\Delta S\% + 0.033t_e^0 \quad (4)$$

The character of changing coefficient of losses for areas of alternating currents was identified by using the Monte Carlo method. There is the lognormal distribution (fig 8). Next characteristic of the energy losses coefficients distribution were gotten (table 8).

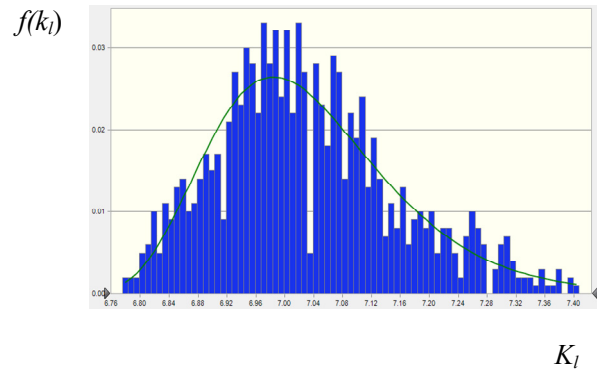


Fig. 8. Histogram of the energy losses coefficients distribution

Limits of changing the energy losses coefficient were identified. They are 6,56 to 7,79 for the area of alternating current.

To further provide recommendations for change of regulation loss factor will determine the degree of influence of each factor.

To area alternating current coefficient of correlation (fig. 9) between energy losses coefficient and temperature changes is 0.0129; ratio between between energy losses coefficient and wear of contact line is 0.0815; between energy losses coefficient and the number of trains areas between traction substations is -0.8562.

The main influence on energy losses coefficient is the number of trains on railway section. The correlation coefficients for areas of alternating currents is -0,8562. Since the correlation is negative, then with the number trains reduced energy losses coefficient. This is supported by previous studies.

Table 5

Characteristics of wear of contact line on areas between traction substations, mm²

Mathematical expectation, μ	Median Me	Mode Mo	Average square expectations, σ	Dispersion, D	Asymmetry γ_1	Excess γ_2	Coefficient of variation, V
9,30	7,40	5,10	6,50	42,19	3,98	40,59	0,64

Table 6

Characteristics of random variables distribution changes of temperature, °C

Mathematical expectation, μ	Median Me	Mode Mo	Average square expectations, σ	Dispersion, D	Asymmetry γ_1	Excess γ_2	Coefficient of variation, V
12,51	12,80	13,65	11,56	133,59	-0.093	2,75	0,92

Distribution laws of factors affecting to the coefficient of energy losses

Parameter	Distribution law	Law's parameter
The number of trains on railway section	Binomial	P=0,0822, n=43
The wear of contact line	Lognormal	m=17,2, σ =5,67
The environment temperature	Weibull	k=50,51, v=4,6924
The speed of trains	Lognormal	m=47,52, σ =22,07

Table 8

Characteristics of the energy losses coefficient distribution

Mathematical expectation, μ	Median Me	Mode Mo	Average square expectations, σ	Dispersion, D	Asymmetry γ_1	Excess γ_2	Coefficient of variation, V
7,04	7,02	6,98	0,13	0,02	0,87	4,38	0,02

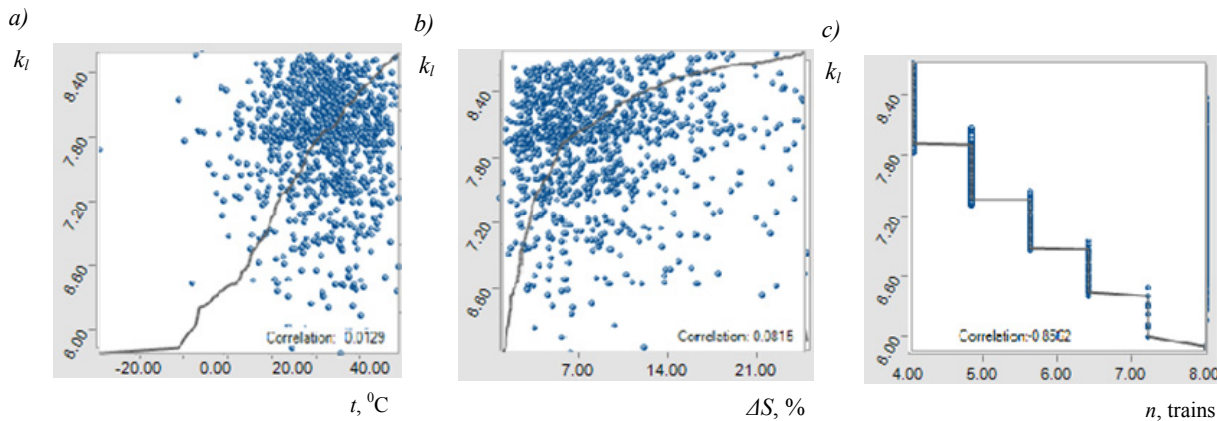


Fig. 9. The correlation of energy losses coefficient versus:
 a – environment temperature; b – the wear of contact line; c – number of trains at the experimental area

Conclusion

1. Probabilistic nature of factors that affect the energy losses coefficient was determined. Limits of their changes and laws of distribution were identified. It was established that the number of trains at the experimental area obeys the binomial distribution. Speed of trains at the experimental area, the wear (reduction of the area) of contact line obey lognormal distribution. The environment temperature obeys Weibull distribution.

2. Based on the mathematical modeling for area of Odessa railway was found that the average losses at the studied area is 12.4%.

3. The energy losses coefficient for area of alternating current obeys the lognormal distribution. These facts were proved on the basis of statistical tests. Mean value of the energy losses coefficient is 7.04.

4. The biggest impact to the the energy losses coefficient has the number of trains at the experimental area. The correlation coefficients for areas of alternating currents is -0.8562.

REFERENCES

1. Kuznetsov W. G., Bosiy D. A., Kirilyuk T. I. Oblik vtrat elektrychnoi enerhii v tiahovii merezhi nepriamym sposobom [Accounting electricity losses in traction network by the indirect method]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport], 2012, issue 42, pp. 103-109.
 2. Bosiy D. A., Kirilyuk T. I. Udoshkonalennia nepriamoho metodu obliku vtrat elektrychnoi enerhii v kontaktnii merezhi. [Improvement indirect method of accounting electricity losses in the contact system] *Vostochno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy* [Eastern-European Journal of enterprise technologies],

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 42. – С. 103-109.
 2. Босий Д. О. Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 35-39.
 3. Кирилюк Т. І. Способи підвищення ефективності електроспоживання на залізницях України / Т. І. Кирилюк // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – № 108 (102). – С. 15-25.

2012, issue 5/8 (59), pp. 35-39.

3. Kirilyuk T. I. Sposoby pidvyshchennia efektyvnosti elektrozpozhyvannia na zaliznytsiakh Ukrainy [Ways to improve the efficiency of power consumption on the railways of Ukraine] *Enerhosberezhenye. Enerhetyka. Enerhoaudyt* [Energy saving. Power engineering. Energy audit], 2012, issue 108 (102), pp. 15-25.

4. Maksimczuk W. F., Kuzniecov W. G., Kalasznikov K. A., Kirilyuk T. I. Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociagow na odcincu [Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociagow na odcincu] *Infrastruktura transport (Poland)*. [Infrastruktura transport (Poland)], 2013, issue 2, pp. 28-31

5. Kuznetsov W. G., Bosiy D. A., Kirilyuk T. I. Vyznachennia rehlamentu zminy koefitsiienta vtrat [Determination of regulation changes of the energy losses coefficient] *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KPI»], 2013, issue 56, pp. 193-198.

6. Kirilyuk T. I. Metod vyznachennia koefitsiienta vtrat na osnovi povnoho faktornoho eksperymentu [The method of determining the energy losses coefficient on the base of full factorial experiment] *Enerhosberezhenye. Enerhetyka. Enerhoaudyt* [Energy saving. Power engineering. Energy audit], 2013, issue 11 (117), pp. 24-29.

7. Domansky V. T., Blokhin V. F., Domanskaya G. A. Eksperimentalnoe opredelenie poter energii v elektrodyagovykh setyakh postoyannogo toka [Experimental determination of the energy loss in Electrotraction DC networks] *Vesnik VNIIZhTa* [Bulletin of ASRIRT (Scientific Research Institute of Railway Transport)], 1990, issue 5, pp. 29-32.

8. Bykadorov A. L., Domansky V. T. Sravnitel'naya otsenka kosvennykh sposobov izmereniya poter energii v kontaktnoy seti peremennogo toka [Comparative evaluation of indirect methods of measuring the energy losses in the contact line of AC] *Trudy Rostovskogo instituta inzh.zh.d.transporta* [Works of the Rostov Institute of Engineers of Railway Transport], 1979, issue 153, pp. 20-27.

9. Bardushko V. D. *Analiz i parametricheskyy sintez sistem tyagovogo elektrosnabzheniya*. Avtoreferat Diss. [Analysis and parametric synthesis of the traction power supply systems]. Irkutsk, 2001, 42 p.

10. Krestyanov M. E. K opredeleniyu poter elektricheskoy energii v tyagovoy seti [By the definition of electric power losses in traction network] *Trudy MII-Ta* [Works of the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)], 1971, issue 380, pp. 3-12.

11. Markvardt K. G., Kuvichinsky A. N., Davydov E. N. Kosvennye sposoby opredeleniya poter elektricheskoy energii v tyagovoy seti [Indirect methods for determining losses of electric energy in the traction network] *Trudy MII-Ta* [Works of the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)], 1969, issue 302, pp. 102-108.

12. Bykadorov A. L., Domansky V. T. Sravnitel'naya otsenka kosvennykh sposobov izmereniya poter energii v kontaktnoy seti peremennogo toka [Comparative evaluation of indirect methods of measuring the energy losses in the contact line of AC] *Trudy Rostovskogo instituta*

4. Maksimczuk W.F. Badania rezerw zasilania poprzez racjonalne rozmieszczenie pociagow na odcincu / W.F. Maksimczuk, W.G. Kuzniecov, K.A. Kalasznikov, T.I. Kirilyuk // *Infrastruktura transport (Poland)*.-2013. – №2 – p.28–31.

5. Кузнецов В. Г. Визначення регламенту зміни коефіцієнта втрат / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*.-2013. – №56 – С. 193-198.

6. Кирилюк Т. І. Метод визначення коефіцієнта втрат на основі повного факторного експерименту / Т. І. Кирилюк // *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит* – № 11 (117), 2013. – С. 24-29.

7. Доманский В. Т. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока / В. Т. Доманский, В. Ф. Блохин, Г. А. Доманская // *Вестник ВНИИЖТа*. – 1990. – № 5. – С. 29-32.

8. Быкадоров А. Л. Сравнительная оценка косвенных способов измерения потерь энергии в контактной сети переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // *Труды Ростовского института инж.ж.д.транспорта*. – 1979. – Вып. 153. – С. 20-27.

9. Бардушко В. Д. Анализ и параметрический синтез систем тягового электроснабжения: Автореф. дис. д-ра. техн. наук: 05.13.01 / ИрГУПС –Иркутск, 2001. – 42 с.

10. Крестьянов М. Е. К определению потерь электрической энергии в тяговой сети / М. Е. Крестьянов // *Труды МИИТа*. – 1971. – Вып. 380. – С. 3-12.

11. Марквардт К. Г. Косвенные способы определения потерь электрической энергии в тяговой сети / К. Г. Марквардт, А. Н. Кувичинский, Е. Н. Давыдов // *Труды МИИТа*. – 1969. – Вып. 302. – С. 102-108.

12. Быкадоров А. Л. Сравнительная оценка косвенных способов измерения потерь энергии в контактной сети переменного тока / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // *Труды Ростовского института инж.ж.д.транспорта*. – 1979. – Вып. 153. – С. 20-27.

13. Доманский В. Т. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока / В. Т. Доманский, В. Ф. Блохин, Г. А. Доманская // *Вестник ВНИИЖТа*. – 1990. – № 5. – С. 29-32.

14. Быкадоров А. Л. Исследование коэффициента настройки счётчиков потерь энергии на имитационной модели / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский, В. М. Ляшук // *Сборник научных трудов ВЗИИТ*. – 1984. – Вып. 121. – С. 62-68.

15. Быкадоров А. Л. Расчёт потерь энергии в тяговых сетях матричным методом / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский // *Труды МИИТа*. – 1979. – Вып. 636. – С. 139-145.

16. Шрейдер Ю. А. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) / Ю. А. Шрейдер – М. : Физматлит, 1962. – 334 с.

inzh.zh.d.transporta [Works of the Rostov Institute of Engineers of Railway Transport], 1979, issue 153, pp. 20-27.

13. Domansky V. T., Blokhin V. F., Domanskaya G. A. Eksperimentalnoe opredelenie poter energii v elektroyagovykh setyakh postoyannogo toka [Experimental determination of the energy losses in DC networks] *Vesnik VNIIZhTa* [Bulletin of ASRIRT (Scientific Research Institute of Railway Transport)], 1990, issue 5, pp. 29-32.

14. Bykadorov A. L., Domansky V. T., Lyashuk V. M. Issledovanie koeffitsienta nastroyki schetchikov poter energii na imitatsionnoy modeli [Investigation of tuning coefficient for energy losses meters with the simulation model] *Sbornik nauchnykh trudov VZIIT* [Collection of Scientific Papers of ACIRE], 1984, issue 121, pp. 62-68.

15. Bykadorov A. L., Domansky V. T. Raschet poter energii v tyagovykh setyakh matrichnym metodom [Calculation of the energy losses in the traction network by the matrix method] *Trudy MIITa* [Works of the Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)], 1979, issue 636, pp. 139-145.

16. Schrader Y. A. *Metod statisticheskikh ispytaniy (metod Monte-Karlo)* [Method of statistical tests (Monte Carlo)]. Moscow, Fizmatlit, 1962, 334 p.

17. Gmurman V. E. *Rukovodstvo k resheniyu zadach po teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistike: Ucheb. posobie dlya studentov vtuzov. – 9-e izd., pererab. i dop.* [Guide to solving problems in the theory of probability and mathematical statistics: textbook manual for students of technical universities. - 9th Edition, Revised. and add.]. Moscow, High School, 2004, 404 p.

18. *Pravyla ulashtuvannia ta tekhnichnoho obsluhovuvannia kontaktoi merezhi elektryfikovanykh zaliznyts. TsE-023* [Rules of Design and maintenance of a contact network of electrified railways. IS-023] Kyiv, Ukrzaliznytsia, 2008, 208 p.

19. Marquardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport, 1982, 528 p.

17. Гмурман В. Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учеб. пособие для студентов вузов. – 9-е изд., перераб. и доп. / В. Е. Гмурман – М. : Высш. школа, 2004. – 404 с.

18. Правила улаштування та технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць. ЦЕ-023: Затв. Наказ Укрзалізниці 20.11.2007 № 546-Ц – К. : Укрзалізниця, 2008. – 208 с.

19. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт – М. : Транспорт, 1982. – 528 с.

Received 15.10.2014.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

Reduction in energy losses is a national objective. It corresponds to the state target economic program of energy efficiency and the development of the sphere of energy production from renewable energy sources and alternative fuels in 2012 - 2015 years.

Formulation of the experiment on the railway is complex task. Therefore the research was carried out by simulation based on the Monte-Carlo method.

The purpose and tasks of the research are establishment of the probabilistic nature of the coefficient of energy losses, determining its average value and finding the factor that has the greatest impact on the coefficient of energy losses.

Distribution laws and the basic characteristics of the factors influencing the coefficient of energy losses were identified during the study. These factors are the wear (reduction of the area) of contact line, the number of trains on railway section, the environment temperature, speed and current of trains.

The law of statistical distribution of the loss coefficient was established for the first time. This makes it possible to evaluate its borders and make recommendations on regulations change it. The average value the loss coefficient is determined by which it will be possible to adjust meter.

Keywords: energy losses, coefficient of energy losses, meter of losses, alternating current, distribution law, modeling, Monte-Carlo method.

УДК 621.331

Т. І. КИРИЛЮК (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: tanya_kir@bigmir.net

МОДЕЛЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В КОНТАКТНІЙ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

Зменшення втрат електроенергії – державне завдання, що відповідає державній цільовій економічній програмі енергоефективності й розвитку сфери виробництва енергоресурсів з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2012 – 2015 роки.

Так як постановка експерименту на залізниці складна задача, то дослідження проведено за допомогою моделювання на основі методу Монте Карло.

Метою роботи є встановлення ймовірнісної природи коефіцієнту втрат, визначення його середнього значення та виділення фактору який має найбільший вплив на коефіцієнт втрат.

В ході роботи встановлені закони розподілу та основні характеристики факторів, що впливають на коефіцієнт втрат, а саме зносу контактних проводів, кількості поїздів на розрахунковій зоні, температури навколишнього середовища, швидкості руху, значення споживаного струму.

Вперше встановлено закон статистичного розподілу коефіцієнта втрат, що дає можливість оцінити його межі та надати рекомендації щодо регламенту його зміни. Визначено середнє значення коефіцієнта втрат, за яким можна буде налаштувати лічильник

Ключові слова: втрати електроенергії, коефіцієнт втрат, лічильник втрат, змінний струм, закон розподілу, моделювання, метод Монте-Карло.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

УДК 621.331

Т. И. КИРИЛЮК (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: tanya_kir@bigmir.net

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Уменьшение потерь электроэнергии - государственная задача, которая соответствует государственной целевой экономической программе энергоэффективности и развития сферы производства энергоресурсов из возобновляемых источников энергии и альтернативных видов топлива на 2012 - 2015 годы.

Так как постановка эксперимента на железной дороге сложная задача, то исследование проведено с помощью моделирования на основе метода Монте-Карло.

Целью работы является установление вероятностной природы коэффициента потерь, определение его среднего значение и выделение фактора который имеет наибольшее влияние на коэффициент потерь.

В ходе работы установлены законы распределения и основные характеристики факторов, влияющих на коэффициент потерь, а именно износа контактных проводов, количества поездов на расчетной зоне, температуры окружающей среды, скорости движения, значение потребляемого тока.

Впервые установлен закон статистического распределения коэффициента потерь, что дает возможность оценить его границы и дать рекомендации по регламенту его изменения. Определено среднее значение коэффициента потерь, по которому можно будет настраивать счетчик.

Ключевые слова: потери электроэнергии, коэффициент потерь, счетчик потерь, переменный ток, закон распределения, моделирование, метод Монте-Карло.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Андрієнко П. Д.*

УДК 621.311

Р. ПАВЕЛЕК (ЛОДЗИНСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, ПОЛЬША),
Ю. Л.САЕНКО (ПГТУ, УКРАИНА)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ул. Университетская, 7, Мариуполь, Украина, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, эл. почта: yls@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ТЯГОВЫХ НАГРУЗОК НА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Введение

К электроэнергетическим сетям, как правило, подключаются различные группы потребителей энергии. Часть из них – это потребители, которые вносят в электрическую сеть электромагнитные помехи в виде: провалов напряжения, колебаний напряжения, переходных процессов, гармоник и т.д. Типичным источником помех является электрическая тяга. Основными устройствами, которые используются для преобразования энергии на тяговых подстанциях, являются выпрямители, которые для электрической сети представляют собой нелинейную нагрузку. Сетевой ток таких нагрузок несинусоидален, что является причиной искажения напряжения [1-3]. Тяговые нагрузки (польские железные дороги РКР) питаются часто от подстанций с высшим напряжением 110 кВ. От шин среднего напряжения тяговых подстанций питаются также и другие потребители. Они получают электроэнергию более низкого качества, особенно это относится к искажению напряжения и появлению высших гармоник. Примерная схема тяговой подстанции представлена на рис. 1.

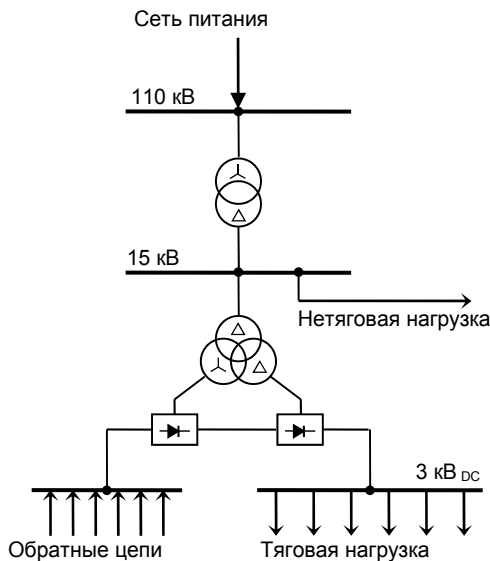


Рис. 1. Схема тяговой подстанции

Выпрямители, используемые в электрической тяге, выполняются все чаще по 12-пульсной схеме. В этом случае необходимо использование трехобмоточного выпрямительно-трансформатора (рис. 1).

С целью определения потенциального влияния тяговых подстанций на работу электрической сети были выполнены исследования нагрузки, а также параметров, которые характеризуют качество электроэнергии выбранной подстанции 110/15 кВ, питающей 3 тяговые подстанции в районе с большим трафиком железнодорожного движения. На подстанции установлены 2 трансформатора 110/15 кВ номинальной мощностью 25 МВА. Распределительная сеть 15 кВ позволяет разделить тяговую нагрузку и остальных потребителей, запитав их от отдельных трансформаторов.

Измерения проводились синхронно двумя анализаторами качества электрической энергии типа Fluke 1760 (устройство класса А) [4], подключенными к обмоткам трансформатора, питающего отдельную тяговую нагрузку, со стороны 110 и 15 кВ. Измерения проведены в период 1 недели с 19.11.10 (0:0 часов) до 26.11.10 (0:0 часов).

Изменение тяговой нагрузки в период измерений

Изменения активной и реактивной мощности тяговой нагрузки в измерительный период со стороны 110 кВ, показаны на рис. 2 и 3.

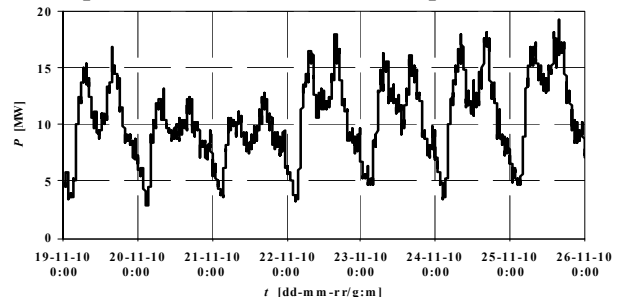


Рис. 2. Изменение активной мощности тяговой нагрузки в измерительный период

Потребление активной мощности изменяется в пределах от 2,85 МВт (минимальная

нагрузка) до 19,23 МВт (максимальная нагрузка), реактивной мощности от 0,1 до 4,7 Мвар при коэффициенте мощности $\cos\phi = 0,96 \div 0,98$ (рис. 4). Такой широкий диапазон изменений позволяет провести оценку влияния тяговой нагрузки на значения параметров, характеризующих качество электрической энергии в точке подключения к сети. Следует также отметить повторяющийся суточный характер изменения нагрузки с меньшими значениями, появляющимися в период выходных.

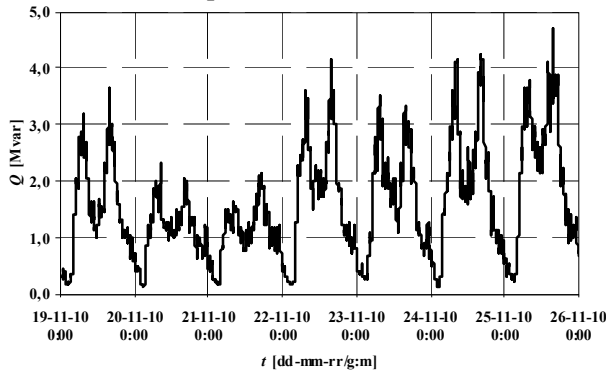


Рис. 3. Изменение реактивной мощности тяговой нагрузки в измерительный период

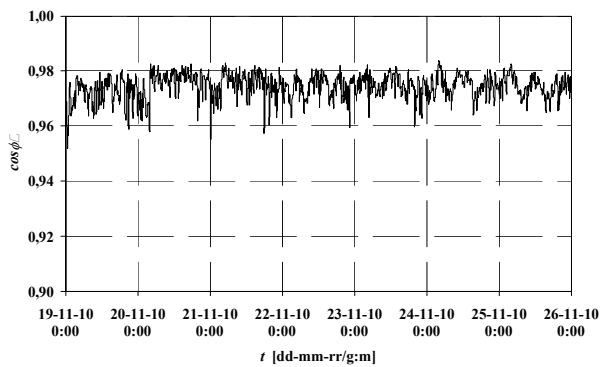


Рис. 4. Изменение коэффициента мощности тяговой нагрузки в измерительный период

Показатели качества электрической энергии

Анализаторы качества электрической энергии типа Fluke 1760 предназначены для измерений и оценки качества электрической энергии согласно требований нормы PN-EN 50160 [5]. На основе этого стандарта базируется также существующее в Польше правило, касающееся качества электрической энергии в соответствии с системным распоряжением [6].

Согласно существующим правилам [5-7] оценку качества электрической энергии необходимо проводить в период не меньше 1 недели. Показатели качества измеряются постоянно (каждый полупериод кривой напряжения со средним 10-минутным интервалом). 95% ре-

зультатов измерений, полученных на протяжении недели должны соответствовать нормативным требованиям. Согласно с требованиями качество электроэнергии определяется параметрами напряжения в точке подключения (соединения) потребителя к общественной сети, описываемые следующими соотношениями.

Значение напряжения

$$U_L\% = \frac{U_L}{U_c} 100\%, \quad (1)$$

где U_c – заявленное напряжение в месте соединения с электрической сетью (как правило, равно номинальному напряжению сети);

U_L – среднее напряжение в измерительном интервале.

Значение напряжения в сетях 15 кВ согласно нормы PN-EN 50160 [5], а в сети 110 кВ согласно системного распоряжения [5] должны быть в пределах $\pm 10\%$ декларированного напряжения.

Коэффициент несимметрии:

$$K_{2U} = \frac{U_{2s}}{U_{1s}} 100\%, \quad (2)$$

где U_{1s} – среднее напряжение обратной последовательности в измерительном интервале,

U_{2s} – среднее напряжение обратной последовательности в измерительном интервале.

Допустимое значение несимметрии напряжения в сети 15 кВ согласно нормы [5] составляет 2%, а в сети 110 кВ, согласно распоряжения [6] равняется 1%. Относительные значения высших гармоник напряжения

$$U_{h\%} = \frac{U_h}{U_1} 100\%, \quad (3)$$

где U_h – среднее значение h -й гармоники ($h = 1, \dots, 40$) напряжения в измерительном интервале;

U_1 – среднее значение основной гармоники напряжения в измерительном интервале.

Допустимые относительные показатели высших гармоник напряжения для сетей 15 кВ согласно нормы [5] указаны в табл. 1, а для сети 110 кВ в соответствии с постановлением [6] – в табл. 2.

Коэффициент искажения напряжения

$$THD\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} 100\%. \quad (4)$$

Допустимое значение коэффициента искажения напряжения в сети 15 кВ согласно [5] составляет 8%, в сети 110 кВ в соответствии с [6] 3%.

Длительная доза фликера

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3}{12}}, \quad (5)$$

где P_{st} является средней в диапазоне измерения кратковременной дозой фликера.

Допустимые значения длительной дозы фликера в сети 15 кВ согласно [5] составляет 1, а в сети 110 кВ согласно [6] составляет 0,8.

Оценка качества электрической энергии

Сводные результаты измерений показателей качества электрической энергии в измерительном периоде в узлах сети 15 и 110 кВ представлены в табл.3.

Таблица 1

Допустимые значения высших гармоник напряжения в сети 15 кВ

Нечетные гармоники				Четные гармоники	
некратные 3		кратные 3			
h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 ÷ 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Таблица 2

Допустимые значения высших гармоник напряжения в сети 110 кВ

Нечетные гармоники				Четные гармоники	
некратные 3		кратные 3		некратные 3	
h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]	h	$U_h\%$ [%]
5	2,0	3	2,0	2	1,5
7	2,0	9	1,0	4	1,0
11	1,5	15	0,5	>4	0,5
13	1,0	>21	0,5		
17	1,0				
19	1,0				
23	0,7				
25	0,7				
>25	$0,2 + 0,5 \frac{25}{h}$				

Таблица 3

Результаты измерений показателей качества электрической энергии в сетях 15 и 110 кВ

Параметры	Сеть 15 кВ				Сеть 110 кВ			
	L1	L2	L3	Доп. знач.	L1	L2	L3	Доп. знач.
U [%]	106,72	106,46	106,47	110,0	110,47	110,55	110,30	110,0
THD_U [%]	11,06	11,37	11,35	8,0	1,41	1,39	1,40	3,0
P_{lt} [-]	0,30	0,30	0,30	1,0	0,31	0,31	0,29	0,8
K_{2U} [%]	0,22			2,0	0,25			1,0

Во время периода измерения было установлено периодичное превышение допустимых показателей в сети 110 кВ в ночной период нагрузки. В свою очередь в сети 15 кВ появляется превышение допустимых значений коэффициента искажения фазного напряжения THD_U .

В свою очередь, значения остальных параметров, которые характеризуют качество электрической энергии, то есть кратковременной (P_{st}) и длительной (P_{lt}) дозы фликера, а также коэффициента несимметрии напряжений (K_{2U}) для обеих рассматриваемых сетей (15 и 110 кВТ)

за весь период измерения не превысил допустимого показателя определенного в нормах [5,6].

В связи с этим последующий материал будет посвящен анализу причин превышения допустимых значений (выделенных в таблице 3 жирным шрифтом) напряжения в сети 110 кВ и коэффициентов искажения напряжения в сети 15 кВ.

Уровни напряжения

На рис. 5 приведены изменения усредненных в пределах 10-минутных интервалов значений фазных напряжений и токов на шинах 110 кВ. На этом рисунке можно заметить четкую корреляцию между изменениями напряжения и тока нагрузки. Изменения напряжения вызваны суточными изменениями нагрузки. Увеличение тока нагрузки сопровождается уменьшением напряжения и наоборот, при уменьшении тока нагрузки напряжения возрастает.

Используя данные, представленные на рис. 5, были обработаны характеристики напряжения и тока рассматриваемого узла сети 110 кВ. Такая зависимость для фазы L1 показана на рис. 6. С целью определения значения напряжения, которое появилось бы на шинах питания без нагрузки, была начерчена линия тренда.

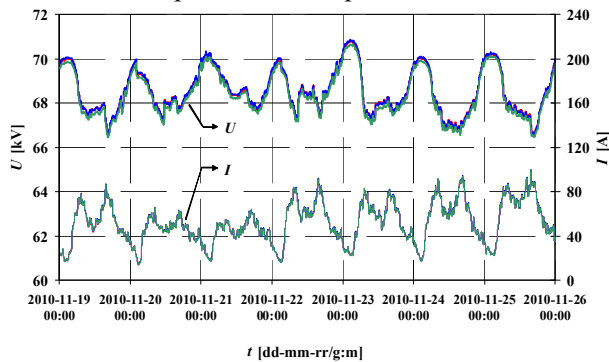


Рис. 5. Сравнение изменений фазовых напряжений на шинах 110 кВ и токов нагрузки в период измерения

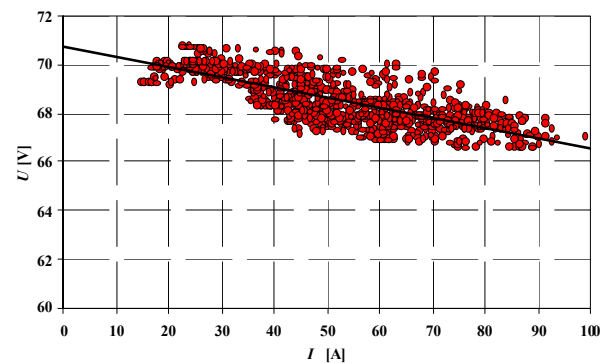


Рис. 6. Зависимость напряжения от тока в сети 110 кВ

Эти явления в сети 15 кВ протекают по другому. На рис. 7, который представляет сравнение изменений значений фазных напряжений в сети 15 кВ с изменениями значений тока

трансформатора со стороны 15 кВ. Так четко видно отсутствие корреляции между изменениями напряжения и тока нагрузки. В свою очередь, можно наблюдать частые изменения напряжения, которые возникают в результате действия регулятора напряжения (РПН), установленного на трансформаторе.

Действие автоматики РПН трансформатора видно на рис. 8, на котором показана зависимость показателей фазного напряжения от тока для фазы L1 в сети 15 кВ. Практически плоские линии тренда, показанные на этих рисунках, свидетельствуют о правильной работе контролера, управляющего работой РПН трансформатора.

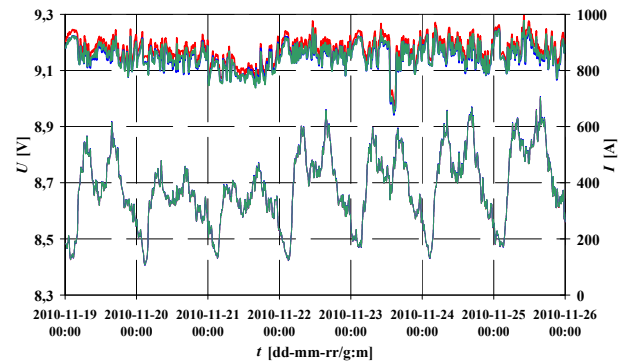


Рис. 7. Сравнение изменений фазных напряжений в сети 15 кВ и токов нагрузки в период измерения

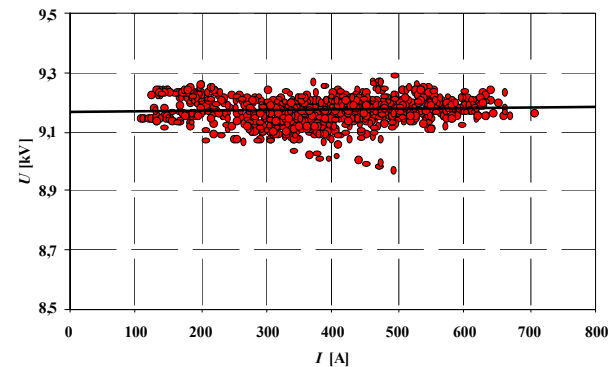


Рис. 8. Зависимость напряжения от тока в сети 15 кВ при работе РПН трансформатора

Высшие гармоники напряжений и токов

Основной нагрузкой трансформатора, подключенного к исследуемой распределительной подстанции на стороне 15 кВ, являются 3 тяговые подстанции, оборудованные 12-пульсными диодными преобразователями. Эта нагрузка характеризуется высокой изменчивостью в течение суток (рис. 2 и 3). Сетевые токи преобразователей сильно искажены (рис. 9) с преобладающей долей 11-й и 13-й гармоник (рис. 10) [8].

Эти преобразователи являются источником высших гармонических токов, частотные спектры которых содержат, прежде всего, гармоники с номерами $h = 12n \pm 1$. Наличие высших

гармоник тока других порядков возникает в основном из-за несимметрической нагрузки отдельных трехфазных 6-пульсных выпрямительных мостов, которые в паре образуют 12-пульсную систему. Из сравнения характера протекания фазных токов с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ, показанных на рис. 9, а также из сравнения относительных значений высших гармоник этих токов, представленных на рис. 10, можно сделать вывод, что искаженные токи практически точно трансформируются из сети 15 кВ в сеть 110 кВ.

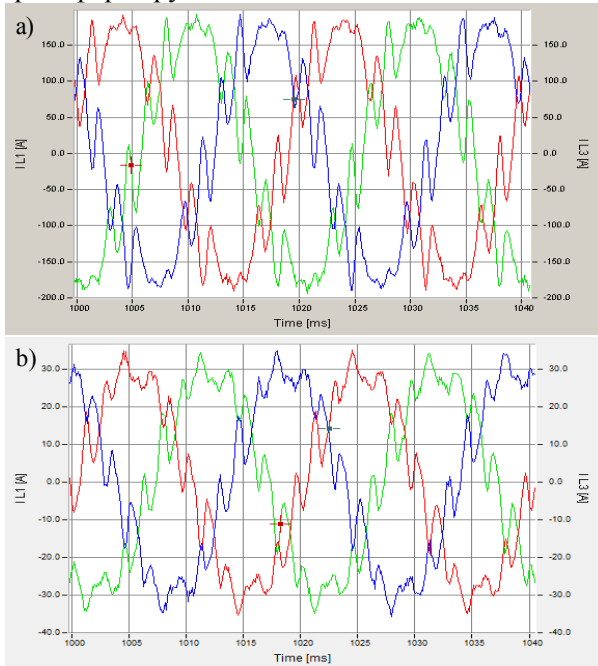


Рис. 9. Мгновенные токи трансформатора со стороны 15 кВ (a) и со стороны 110 кВ (b)

Конечно, гармоники токов и, как следствие, коэффициент искажения тока, являются значительно меньшими со стороны 110 кВ, чем со стороны 15 кВ. В связи с этим их влияние на питающую сеть, а особенно на искажение напряжения в сети 110 кВ будет меньше.

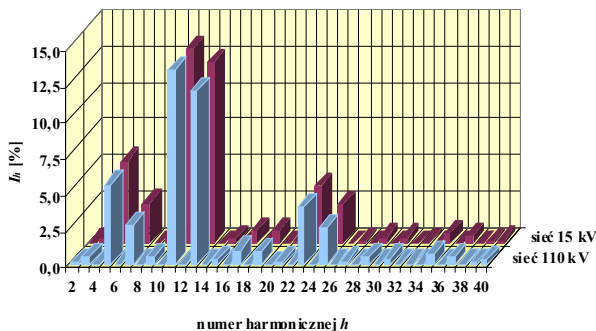


Рис. 10. Сравнение относительных значений высших гармоник тока с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ

На рис. 11 показано изменение коэффициента искажения напряжения в сети 15 кВ. Пре-

вышение допустимого значения THD_U (8%), имеет место практически на протяжении всего периода измерения во всех фазах.

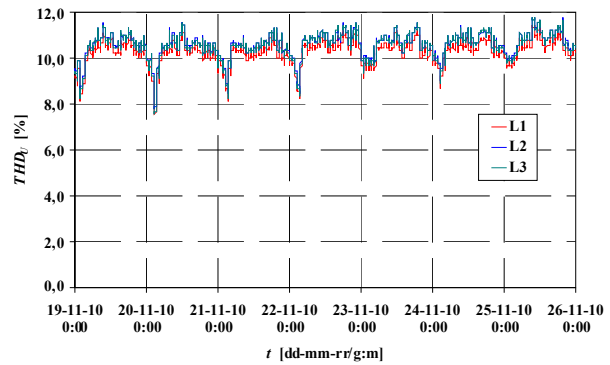


Рис. 11. Изменение THD_U трех фазных напряжений со стороны 15 кВ в период измерения

Из сравнения изменения фазных напряжений с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ, показанного на рис. 12, а также из сравнения относительных значений высших гармоник этих напряжений (рис. 13) можно сделать однозначный вывод, что фазные напряжения в сетях 15 кВ и 110 кВ отличаются как уровнем искажения, так и составом частотного спектра высших гармоник.

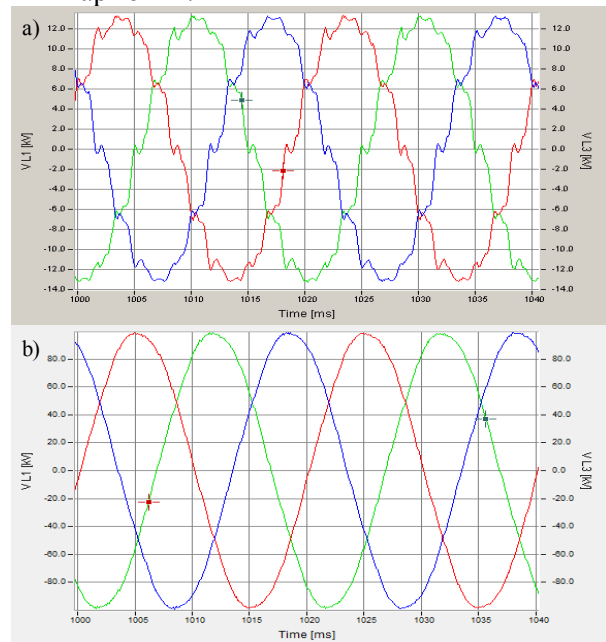


Рис. 12. Изменения фазных напряжений со стороны 15 кВ (a) и со стороны 110 кВ (b) трансформатора

Из сравнения рис. 10 и 13 можно сделать вывод, что искажение напряжения со стороны 15 кВ, вызвано тяговой нагрузкой, поскольку напряжения и токи имеет идентичный состав высших гармоник и в обеих величинах (токов и напряжений) доминируют те же высшие гармоники, характерные для 12-импульсных преобразователей. Совсем другая ситуация возникает в сети 110 кВ. Доля высших гармоник, вызван-

ных тяговой нагрузкой, является почти незаметной в частотном спектре напряжения, в свою очередь существенное значение имеют 3-я, 5-я и 7-я гармоники, которые являются так называемым фоном искажения, вызванного влиянием многих различных потребителей сети 110 кВ.

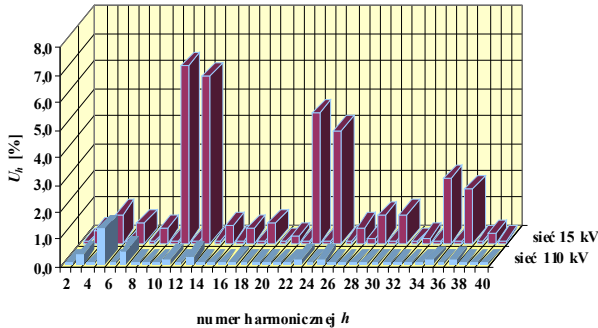


Рис. 13. Сравнение высших гармоник напряжения с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ

Выводы

Из проведенных измерений следует, что в рассматриваемом случае искажение напряжения на шинах распределительной подстанции 15 кВ (которое характеризуется коэффициентом искажения фазных напряжений THD_U) на протяжении всего периода измерений превышает показатели, допускаемые [1, 2] (табл. 3, а также рис. 11). В связи с этим не допускается питание от этой сети других потребителей.

Кроме того, на основе представленных выше исследований можно утверждать, что:

1. Высшие гармоники тока передаются через трансформатор из сети 15 кВ в сеть 110 кВ с сохранением практически таких же соотношений между отдельными гармониками и основной гармоникой. Это обеспечивает сохранение формы мгновенных токов с обеих сторон трансформатора.

2. В сети 15 кВ существует четкая корреляция между высшими гармониками напряжения и тока, где в напряжении доминируют 11-я, 13-я, 23-я и 25-я гармоники, которые характерны для 12-пульсных тяговых преобразователей. Следо-

вательно, тяговая нагрузка является основной причиной искажения напряжения в сети 15 кВ.

В сети 110 кВ отсутствует корреляция между высшими гармониками напряжения и тока. В токе доминируют 11-я, 13-я, 23-я и 25-я гармоники, в свою очередь, в напряжении наибольшие значения имеют 3-я, 5-я и 7-я гармоники, причиной которых являются потребители, которые находятся вне исследуемой подстанции.

REFERENCES

1. Brociek W., Wilanowicz R., Higher harmonics and voltage flickers estimation In transformer station supplying nonlinear load with 12-pulse converter, *Przeгляд Elektrotechniczny*, 78 (2005), nr 2, s. 29-32.
2. Dzienis W., Badanie jakości energii elektrycznej na szynach zbiorczych SN w podstacjach trakcyjnych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2010, nr 27, s. 49-54.
3. Skliński R., Dzienis W., Obliczanie odkształcenia prądu i napięcia na szynach zbiorczych SN podstacji trakcyjnych z 12-pulsowymi zespołami prostownikowymi, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2010. nr 8, s. 3-9.
4. EN 61000-4-30: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and Measuring Techniques - Power Quality Measurement Methods.
5. EN 50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
6. Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku, w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dziennik Ustaw nr 93 z dnia 29 maja 2007 r., poz. 623.
7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 1997. – 60 с.
8. Zhezhelenko I.V., Shidlovskiy A.K., Pivnyak G.G., Sayenko Y.L. Electromagnetic compatibility in electric power supply systems. – Textbook for institution of higher education. 2nd edition. – D.: National Mining University, 2013. – 239 p.

Поступила в печать 17.09.2014.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

Электрическая тяга является типичным потребителем, который создает помехи в питающей сети в виде искажений токов и напряжений. В статье представлен анализ результатов измерений высших гармоник тока и напряжения, выполненных на шинах 110 кВ и 15 кВ распределительной подстанции. Проведено исследование распределения высших гармоник между сетями 15 и 110 кВ, после выполнения которого можно сделать вывод, что искажения напряжения со стороны 15 кВ вызвано тяговой нагрузкой, а конкретно высшими гармониками, характерными для 12-импульсных преобразователей. В свою очередь, в сети 110 кВ токи и напряжения не имеют идентичный состав высших гармоник, что говорит о искажениях, связанных с потребителями, которые находятся вне исследуемой подстанции. Справедливость полученных выводов аргументируется графиком сравнения высших гармоник тока и напряжения с обеих сторон трансформатора 110/15 кВ, на котором отображается доминирование высших гармоник определенного порядка в зависимости от фактора, влияющего на ток и напряжение.

Ключевые слова: тяговая нагрузка, качество электрической энергии, ток, напряжение, высшие гармоники.

УДК 621.311

Р. ПАВЕЛЕК (ЛОДЗИНСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, ПОЛЬЩА),
Ю. Л. САЄНКО(ПДТУ, УКРАЇНА)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»,
вул. Університетська, 7, Маріуполь, Україна, 87500, тел.: (0629) 44-65-51, ел. пошта: yls@mail.ru

ВПЛИВ ТЯГОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Електрична тяга є типовим споживачем, який створює перешкоди в мережі живлення у вигляді спотворень струмів і напруг. У статті представлено аналіз результатів вимірювань вищих гармонік струму і напруги, виконаних на шинах 110 кВ і 15 кВ розподільчої підстанції. Проведено дослідження розподілу вищих гармонік між мережами 15 і 110 кВ, після виконання якого можна зробити висновок, що спотворення напруги з боку 15 кВ викликано тяговим навантаженням, а конкретно вищими гармоніками, характерними для 12-імпульсних перетворювачів. У свою чергу, в мережі 110 кВ струми і напруги не мають ідентичний склад вищих гармонік, що говорить про спотворення, пов'язані з споживачами, які знаходяться поза досліджуваною підстанцією. Справедливість отриманих висновків аргументується графіком порівняння вищих гармонік струму і напруги з обох сторін трансформатора 110/15 кВ, на якому відображується домінування вищих гармонік певного порядку в залежності від фактора, що впливає на струм і напругу.

Ключові слова: тягове навантаження, якість електричної енергії, струм, напруга, вищі гармоніки.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 621.311

R. PAVELEK (LODZ TECHNICAL UNIVERSITY, POLAND),
YU. L. SAENKO (ASTU, UKRAINE)

State higher education institution «Azov State Technical University», 7 Universitetskaya Street, Mariupol, Ukraine, 87500, tel.: (0629) 44-65-51, e-mail: yls@mail.ru

THE INFLUENCE OF TRACTION LOADS ON THE POWER SUPPLY SYSTEMS

Electric traction is typical consumer who creates obstacles in the power supply in the form of distortion of currents and voltages. The paper presents the analysis of the results of measurements of higher harmonics of current and voltage performed on 110 kV and 15 kV distribution substation. A study of the distribution networks of higher harmonics between 15 and 110 kV, after executing it can be concluded that the distortion of the voltage 15 kV traction caused by stress, specifically higher harmonics characteristic of 12-pulse converters. In turn, the network 110 kV voltage and currents have identical composition of higher harmonics, which indicates the distortion associated with consumers beyond the investigated stations. The validity of these findings and discusses the schedule comparison of higher harmonics of current and voltage on both sides of the transformer 110/15 kV, which displayed the dominance of higher harmonics particular order, depending on the factors affecting the current and voltage.

Keywords: traction load, power quality, current, voltage, higher harmonics.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

A. SZELAG (WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, POLAND)

Warsaw University of Technology, Electric Traction Division, Pl. Politechniki 1, 00-661, Warszawa, tel.: +48 22 234-72-17, fax: +48 22 625-75-24, e-mail: adam.szelaq@ee.pw.edu.pl

APPLICATION OF MODELING AND SIMULATION TECHNIQUES AS METHODS FOR FEASIBILITY STUDIES AND DESIGN IN ELECTRIC TRACTION SYSTEMS

Introduction

Modeling means creation of a model (imitation) representing a given object (system) and consists in the development of such a new (physical or virtual) object (system), which would have the features and would operate as the being represented (imitated) system. Making experiments with operation of the derived model (solving model) for the set of predefined conditions is called *simulation*.

The obvious advantages of modeling and simulation, as a research method, include:

- possibility of solving the problems, which cannot be resolved due to other easier methods, and the research on the actual object is impeded;
- the possibility of fast research and analysis of different variants,
- easiness in the change of input parameters of the researched circuits; but there also occur obstacles such as:
 - scarcity of universal models (a generalization of the model causes significant complications);
 - complication and significant workload required for software.

Each year the scope of application of modeling and simulation expands. The development of computer technology in recent years resulted in a new approach to the research work on ETS viewed as a complex electromechanical system. Methods of computer-aided analysis, design and simulation are using system of the electrified transport (fast railway, suburban railway, tram trolleybus, metro) with emphasis put on the energy consumption and compatibility, as well as limitations resulting from the impact on technical infrastructure and environment. The process of analysis and design of ETS has to be sufficiently enough so as to provide proper and safe operation of the actual system, in accordance with the tasks imposed by the freight and that the proposed technical solutions would be technically feasible in obtaining the lowest possible effort but also environmental friendly.

Methods of computer-aided design and simulation are used at the design stage of system (analy-

sis of ETS as a whole) and at the transition to the design of individual subsystems and their components. An important step is to define ETS subsystems and their interrelations in the processing and transmission of energy. Detailed analysis of the transformation and power transmission as well as related parameters (energy consumption for traction purposes, efficiency, capacity, instantaneous power, maximum, medium, replacement and installed power, and the level of their utilization, overload, etc.) allow not only to design the system, but also to conduct studies on the operation of the various subsystems under the states of normal and emergency operation.

This issue is important for subsystems of transmission and distribution of electricity: power supply networks (PSN), traction substation (TS), catenary (C), circuits of electricity conversion in the electric traction vehicles (ETV), track circuits (TC). Study work in the field of ETS differs from the analysis conducted in the range of not-rail electricity supply (urban, industrial). First of all, we are dealing here with a few basic differences:

- circuits supplying traction vehicles have changeable typology with respect to the motion of traction vehicles (changeable point of power delivery), what causes the changeability of parameters of the ETS supplying circuit (voltage and resistance changes at the point of current consumption) significantly influencing the ETS characteristics as energy recipients and their traction capacities,
 - occurrence of the fast changing in time traction load, which value depends on the power, currently collected by the ETV on a track,
 - in the zone of ETS influence (around the railway line and trackside equipment) occur subsystems with various types of supplying voltages (HV-high voltage and MV-medium voltage AC, 3kV DC, AC, LV- controlling and signaling devices of different frequencies)
 - Modern methods of analysis and computer implementation allow a more accurate reflection of the actual functioning of the ETS system, including the phenomena, which often have been overlooked,

or considered just in fragments. The degree and extent of simplifying assumptions depend on the purpose of the work, available resources and the required level of specificity of the conducted analysis.

Formulation of simulation models of the complex system, such as ETS, requires not only analytical, theoretical, but also a methodological approach and includes:

- formulation of a sufficiently accurate model of the actual system (object) with the formalization of phenomena occurring in the system,
- development of an algorithm for modeling and selection of strategies for problem-solving, a strategy that would be optimal with respect to goals to be achieved, calculation time, technical capabilities of equipment, requirements concerning output and input data,
- application of simulating models for problems solving -according to the range of analyses: preliminary, design, research and didactics.

Development of ETS models usually begins with determining the set assumptions, concerning:

- a) object and the aim of model creation
- b) range of application and users
- c) requirements toward models, field of covered issues, degree of specificity and complexity,
- d) applied tools (devices), which would be employed in the process of implementation (execution) of a model.

Functional aims - define tasks to be fulfilled by the developed models, e.g. when the task is to rationalize energy consumption in the ETS system, models are to:

- realistically describe the energy and power consumption in the actual conditions and forthcoming ETS systems including types of lines (international main lines, national main lines, secondary, freight and suburban lines),
- enable the allocation of energy into useful energy (traction), the energy of own needs, losses in vehicles, losses in the catenary, losses in substations, power transmission losses in the power system etc. as well as define relations and feedbacks between particular elements of a system, its parameters, input and output values,
- provide measures that would enable the development of a simulation model for the analyses aiming at obtaining technical efficiency of traction systems, which can be tested in theory (performed simulations) before their application in practice. Models should allow for the evaluation of the efficiency of various measures, so that these could be introduced that will prove, in concrete terms, to be most effective.

When the task is to analyze the compatibility of various subsystems and electronic devices, functioning in the ETS, models should take into account interactions, such as the influence of the variable component of the traction current flowing in rails on the possibility of disrupting the control and signaling circuits.

Structural aims define architecture (structure) of the developed models; describe how models are formulated from the viewpoint of their effective use. Therefore, it is usually assumed that the ETS model has a modular structure, which means that each module (model subsystem) can be developed separately, then tested and verified and included into the functional structure of ETS model. Thanks to this, model of each subsystem can be used independently and modified (or removed) with no need of structural changes of model of a whole system, which would require major reconstruction and modification. This is possible if the model of subsystem is replaced by a preconceived sets of input values, which change in the function of time, and generated previously during a process of simulation or when they are averaged (e.g. during switching off the module regarding the traction power supply system (TPSS), it can be assumed that voltage on the ETV current collectors has a constant value or changes according to the set run, e.g. stochastically).

Structure of ETS models

ETS model may have a modular structure, and ETS as a complex system can be described by a finite number of subsystems. With computer simulation, it entails a certain amount of subprograms interacting with each other and with the main program. Moreover, the structure of ETS model should be sufficiently flexible so as new modules could be inserted e.g. resulting from the introduction of a new rolling stock, new construction of power facilities, changes in terms of traffic, the application of new technologies. At the same time when the connections and relations between the modules (subsystems) are included, a model of ETS will have a complex character.

The main technical requirement posed to ETS (and subsystems) is to ensure conditions for reliable movement for demanded traffic (TD), which should be accomplished in the presence of dependences between subsystems and lead to the situation where traffic output (TO) will correspond with the demanded traffic (TD). By setting transport (TD) one introduces macroscopic data aggregated for the whole ETS. Values as demanded electric energy (EE) and resulted transport work (TO) are also of

macroscopic character and do not provide information about conditions of functioning of particular subsystems (fig. 1).

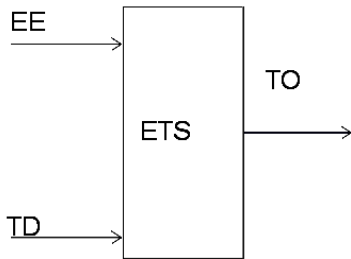


Fig. 1. ETS model at the highest level of aggregation

The description of the ETS as a complex system for functional analyses can be seen at different levels of aggregation:

- ETS as a system (the highest level of aggregation) with a low degree of detail, using as data an annual, average forecast of mobility (fig. 1);
- ETS as a system decomposed into a set, associated with each finite number of subsystems (the lower level of aggregation, higher degree of specificity e.g. use of schedules and simulation of the system for peak hour traffic) (fig. 2);

- microscopic observation of selected issues in the elements of subsystems (e.g. I_c current of the selected ETS in steady-state conditions of a period of milliseconds with the performed analysis of FFT etc.) (fig. 3).

In this paper, the adopted methodology is considered to be a set of mutually dependent subsystems (Fig. 2): TT, ETS, TPSS, and TS, PSN [1-3, 6-8, 11-14] that simplifies the process of formulation, modification and computer implementation of models. Particular attention should be paid to the interactions between the subsystems that decide about realization of transport (ETS) and traction power supply system (TPSS) as well as to the TS disturbing influence on the power supply network (PSN) and current harmonics taken by ETV on the traffic control circuits [4, 15-18]. For the detailed analysis regarding the issues occurring in micro-scale, the models that can be used are disaggregated with varying level of specificity and the phenomena are considered at different time scale, for the creation of which results obtained from models of higher aggregation scale (Fig. 1) can be used.

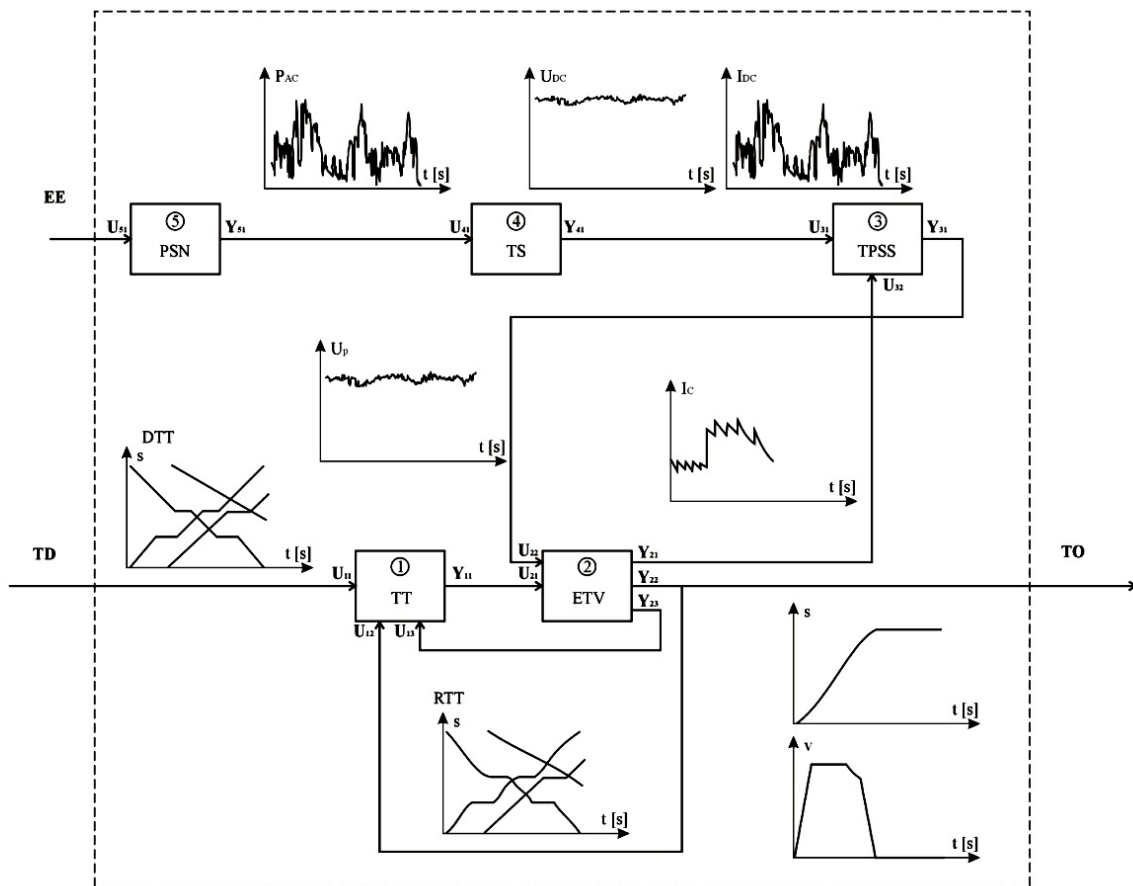


Fig. 2. Functional scheme of ETS system after decomposition into subsystems and presentation of exemplary time runs (time axis scaled in seconds) of input and output values: TT – time-table; DTT – demanded time-table, RTT – actual (resulted) time-table, TD – transport demand, TO – transport output

It allows to take into account mutual dependencies between subsystems and their components as well as their influence on the obtained results of simulation (Fig. 2), which later undergo the process of aggregation (T-transport output, EE-electric energy consumed by the ETV) [9-12] in order to be compared with assumptions (TD-transport demand) and calculations of ratios, which characterize ETVs (unitary energy consumption). It should be also considered that an independent examination of the various subsystems and their analysis at excessive level of aggregation, as it was observed in some other methods applied [5] accounted for a substantial simplification.

Therefore, the use of such methods should be reviewed to assess if the obtained accuracy is proper taking into account the purposes of analysis. Similarly, at the stage of model formulation limitations and aside conditions, which define the range of conducted analyses or the application of models, should be considered. They might be resulted from physical properties of the analyzed systems, but also from the assumed standards or imposed requirements. Those variants, which are not forbidden by the limitations (do not fulfill the requirements) constitute permissible variants (achievable).

Generalized scheme model of ETS system decomposed to the sub-models is presented in Fig. 2 [11, 13], where matrixes of values have been determined:

U -input, Y - output and Z - disturbances influencing from the outside on the various subsystems in the ETS system composed of n -number ETV ($i=1, \dots, n$), m - TS and

U_{11} – matrix of defined transport flow and parameters (masses m_i , locomotives types t_i , speed v_i (t) etc.) of i^{th} ETV,

$U_{12}=Y_{22}$ – location $s_i(t)$ and speed $v_i(t)$ of i^{th} ETV,

$U_{13} = Y_{23}$ - acceleration $a_i(t)$ of i^{th} ETV,

$Y_{11} = U_{21}$ – set manner of running of ETVs,

$U_{22}=Y_{31}$ – matrix of voltages $U_{pi}(t)$ on collector of i^{th} ETV,

$Y_{21}=U_{32}$ – matrix of currents $I_{ci}(t)$ collected by of i^{th} ETV,

$U_{31} = Y_{42}$ –current of feeder $I_{zj}(t)$ and TS $I_{cj}(t)$, U_{dj} voltage at DC bus-bars of j^{th} -TS,

$U_{41}=Y_{51}$ – power P_{ACj} and traction substation current I_{ACj} flowing in PSN, U_{Acj} voltage on AC bus-bars of j^{th} TS,

U_{51} - voltage U_{SEj} and short circuit power S_{zwj} of electric power system (EE) at the point of PSN connection to the supplying TS.

Dynamic model of the ETS system can be presented in the generalized manner in shape of set of equations describing the respective subsystems

$$\frac{d\mathbf{X}_i(t)}{dt} = f_i(\mathbf{X}_i(t), \mathbf{U}_i(t), \mathbf{Z}_i(t)); \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_i(t) = \mathbf{G}_i(\mathbf{X}_i(t), \mathbf{U}_i(t), \mathbf{Z}_i(t)), \quad (2)$$

where $i = 1..5$ and structural equations

$$\mathbf{U}_i = \mathbf{H}_i \mathbf{Y}_i, \quad (3)$$

where $\mathbf{X}_i(t)$ – vector of state variable of i^{th} subsystem.

Dimensions of the matrix structural equations depend on the number and types of ETVs moving along the railway line, the TPPS system and number of traction substations TS (m) as well as their scheme of supply by the power system.

After the presentation of the overall structure of the ETS, next step is to formulate specific dependencies describing operation of various subsystems and relationship between them. The shape of mathematical dependencies (1)-(8) will rest on types of issues to the analysis of which will be suitable.

$$U1 = \begin{bmatrix} u11 \\ u12 \\ u13 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u11 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y21 \\ y22 \\ y23 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$U2 = \begin{bmatrix} u21 \\ u22 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y11 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y31 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$U3 = \begin{bmatrix} u31 \\ u32 \\ u33 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y41 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y21 \\ y22 \\ y23 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U4 = u41 = y51 \quad (7)$$

$$U5 = \begin{bmatrix} u51 \\ u52 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u51 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y41 \\ y42 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Dimensions of the matrix structural equations depend on the number and types of ETVs moving along the railway line, the TPPS system and number of traction substations TS as well as their scheme of supply from the power system. After the presentation of the overall structure of the ETS, next step is to formulate specific dependencies describing operation of various subsystems and rela-

tionship between them. The shape of mathematical dependencies (1)-(8) will rest on types of issues to the analysis of which will be suitable.

In general, they will be the differential equations, algebraic equations and schemes of opera-

tions (algorithms) functional, characteristics. Example of the application of state variable method used for the description of mutual interaction of ETV-TPSS subsystems for the ETS are presented in [2, 8, 10-13].

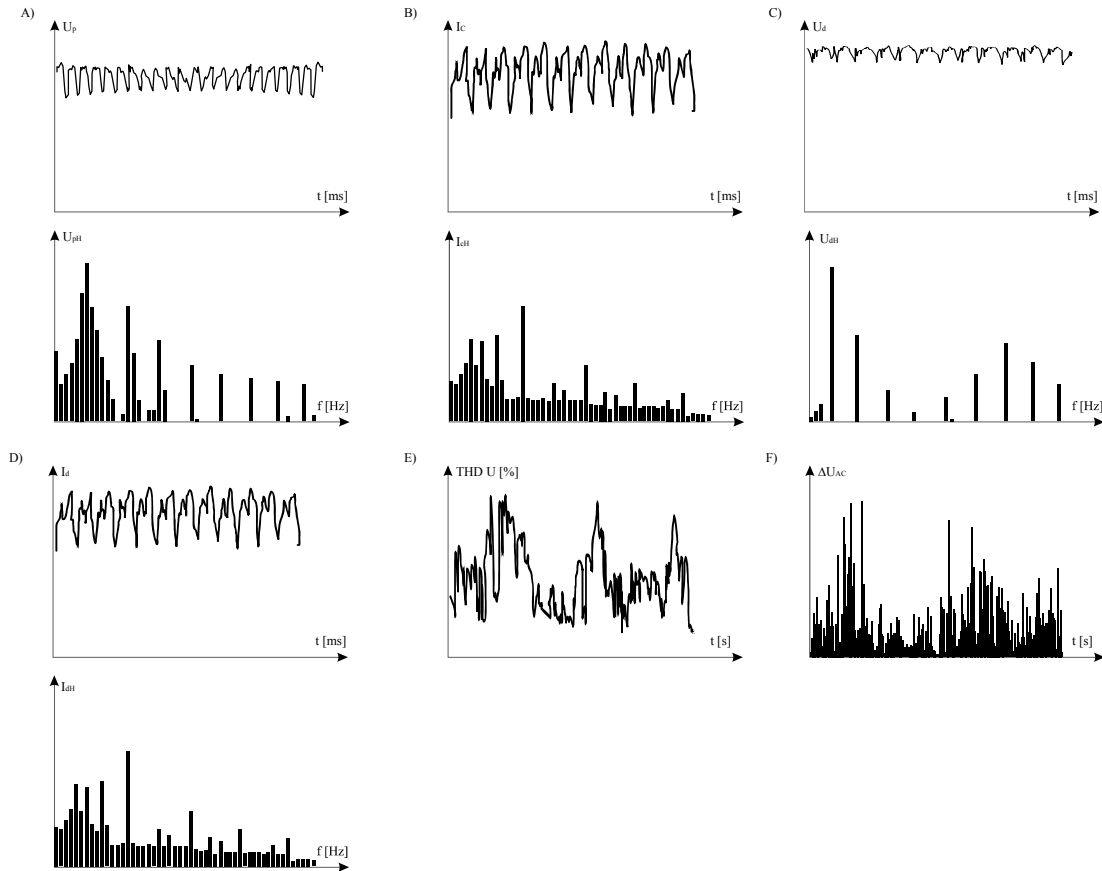


Fig. 3. Exemplary graphs of chosen input and output quantities from the fig.2 after specification and performing of harmonics analysis with application of FFT (A, B, C, D) as well as analysis of disturbances – voltage total harmonic distortion THD U (E) and voltage fluctuation ΔU_{AC} (F)

Traffic demand as input for power supply system load simulation

Electrical load, voltage and currents in the circuits of ETS depend on a type of traffic, rolling stock and TPSS applied. Therefore, the basic set of data taken for modeling of the functioning of the ETS is a set transport workload - traffic output (Fig. 1) resulting from actual or re-casted demands for transport services (usually given per a defined year). This traffic flow B should undergo de-aggregation so to perform a determination of an organization and technology of transport service, i.e. division traffic flow B into specific j^{th} transport service B_{pj} (freight, passenger etc. of n-number) and k-types of ETV trains B_{pji} (of m-number, for each of them is declared: mass, average v_{srji} and maximum v_{maxrji} speed, rated power P_{ji}) in the j^{th} transport service [5-8, 10-13, 16].

The following relationships are satisfied

$$B = \sum_{j=1}^n B_{pj} \quad (9)$$

$$B_{pj} = \sum_{i=1}^m B_{pji} \quad (10)$$

In accordance with the timetable, trains on a set k^{th} section of an L_k route do have specific time lag of Δt_{ki} and locations l_{ki} as well as time of planned stops Δt_{pki} . In typical situations of ERL operation, ETV traffic takes place due to a specified timetable (passenger trains), or intended for use by freight trains, routes reserved in the timetable, with the elements of a random nature (disturbance of traffic, unplanned shutdowns, speed slowdowns, disruptions in the supply system etc.).

Preparation of data for modeling of freight trains traffic can be resolved into defining the k^{th} section of L_k route and T_k specified period of pos-

sible use of routes of traffic in the timetable, on which it is possible to lead freight trains (fig.4), where it is indicated:

N_{ok} - line capacity in the period T_k ,

$\Delta t_{min k}$ - the minimum possible time lag between the possible routes of trains,

n_k - the maximum number of trains that can simultaneously be on the L_k section (minimum time interval Δt_{imink}) due to technical and safety limitations, resulted from the applied control and signaling systems.

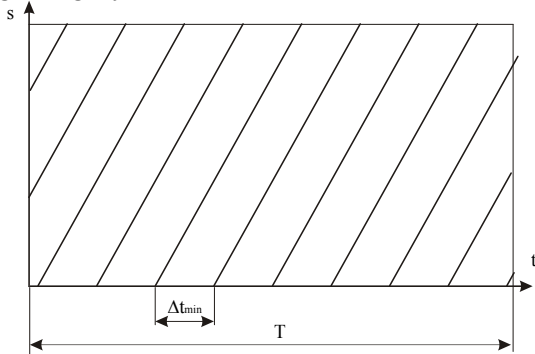


Fig. 4. Scheme of transport routes for a section of ERL

The relations between these parameters are as follows

$$N_{ok} = \frac{T_k}{\Delta t_{min k}} \quad (11)$$

$$n_k = \frac{N_{ok} L_k}{T_k v_{srk}} \quad (12)$$

The implementation of transport schedule, established in the timetable is only possible if one ensures the maintenance of the assumed v_{av} - medium speed of trains of each category on sections.

Failure to meet the average speed v_{av} can lead to a disruption in the conduct of traffic and becomes a limitation in the implementation of set transport flow. Useful power of locomotives P_l , providing the maintaining of set values of a train's speed are conditioned by the capacity of the traction power supply, i.e. effectiveness of energy delivery with demanded current and voltage level in catenary.

The increase in mass and speed of trains will cause an overload or capacity of the supply network with reduction of quality and quantity of energy delivered to the vehicle, thus reducing the P_l power of the locomotive, results in a lower speed. For each configuration of power supply, there is a *limited volume of transport* B_g (divided into different categories B_{jg} and types of trains B_{jig}) after exceeding this limit, TPSS becomes unwieldy in a sense of power and energy supply or due to the criteria of proper supply by the PSN [11, 12, 15-22].

Thus, with such a TPSS configuration it is not possible to implement the requested transport B .

Exceeding the limits of transport volume for a given structure of power supply induces the modernization of TPSS. An assessment of a timetable construction and its impact on the functioning of ERL requires an analysis of all possible variants of the timetable with combinations of masses, speeds and power of trains. In methods used for the dimensioning of ERL equipment [6, 8, 11-13], typically only a part of timetable is being used, regarded as the critical load (the period of peak traffic, traffic with the highest power consumption and rated power of trains).

Any schedule or a compilation of the number of trains and their masses for a given section can be characterized by statistical layout of frequency of occurrence of a given train category. It is possible to use pseudo-random number generator of a specified distribution (e.g. Poisson's), which allows to take into account the random nature of the occupancy of the route by a freight train or occurring disturbances Z_1 (Fig. 2) of a different nature (e.g. unscheduled stop). In a similar manner one can take into account the variability of entry times of trains on a section (random variation in the spacing between trains), additional, unplanned stops, and their distribution (e.g. by usage of pseudo-random number generator to determine if the signal of a semaphore allows or not for the entry to the next section, deviations from the time stops at stations, etc. In such a manner one can obtain a range of possible to occur, variations of motion patterns, which constitute models of TT schedules, forming an input data for a simulation of ERL operation.

The *timetable model* (TT) can be presented in a graphical form as a diagram of a route in a function of time t , t.i. $s = f(t)$ (fig.4), for each of p trains, passing a section at given time. This chart is presented in a simplified form as a line, consisting of sections between adjacent traffic checkpoints. In the model TT as the ERL subsystem (fig.2) following set of input values has been adopted

$$U_{11} = \{s_{ri}(t), m_i, t_i, t_{pi}, v_{srzi}, v_{maxi}(s_i), P_p(s_i), R_r(s_i)\} \quad (13)$$

where $s_{ri}(t)$ – scheduled location of i^{th} ETV in a function of time t ,

m_i - mass of i^{th} ETV, $i=1..p$,

t_i –locomotive type of i^{th} ETV,

t_{pi} – type of i^{th} ETV (passenger, freight, traction unit, high speed train of speed up to 200km/h, train with tilting body, etc.),

$v_{pmax}(s_i)$ - speed limit speed of i^{th} ETV on a section of a route s_i ,

$P_p(s_i)$ – vertical profile of a line (inclination) on a section of a route s_i ,

$R_r(s_i)$ – horizontal profile (curves) on a section of a route s_i .

And matrixes

$$U_{12} = \begin{bmatrix} v_1(t_j) & a_1(t_j) \\ \dots & \dots \\ v_p(t_j) & a_p(t_j) \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$U_{13} = [s_1(t_j), \dots, s_i(t_j), \dots, s_p(t_j)]^T, \quad (15)$$

where

- $s_i(t_j)$ – location of i^{th} ETV in time t_j ,
- $v_i(t_j)$ – speed of i^{th} ETV in time t_j ,
- $a_i(t_j)$ – acceleration of i^{th} ETV at time t_j .

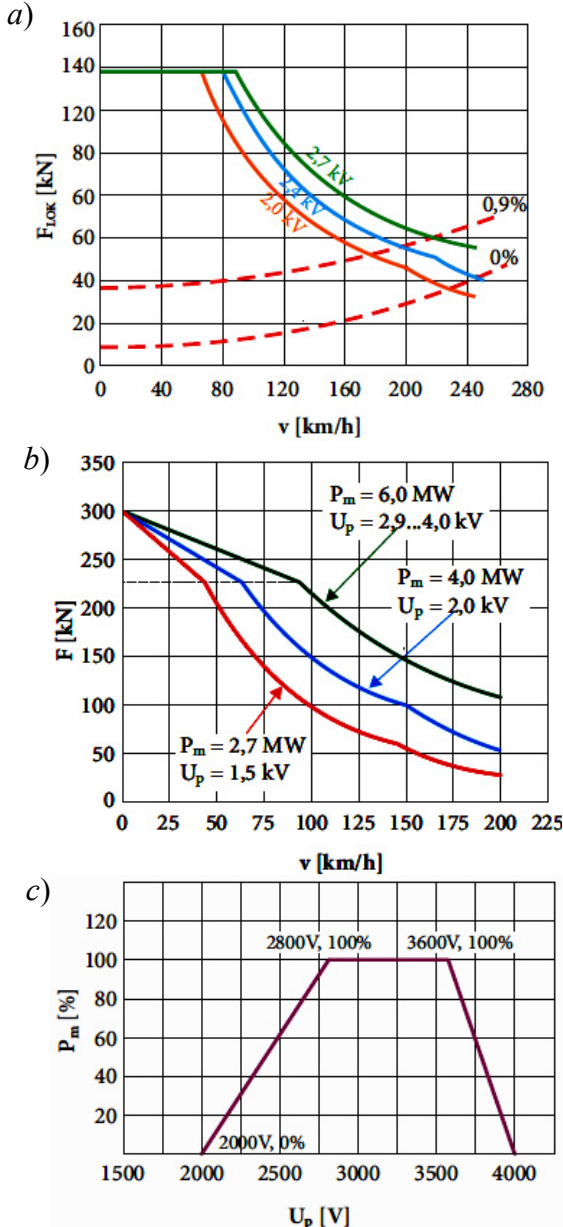


Fig. 5. Exemplary traction characteristic with voltage U_p at its pantograph dependence: a) electric traction unit (EMU) for speed over 200 km/h; b) 6 MW loco; c) interregio EMU

It is important to take into account influence on voltage in catenary on traction characteristics (fig. 5).

The following matrix constitutes output values

$$Y_{11} = [z_{s1}(t), \dots, z_{si}(t), \dots, z_{sp}(t)]^T \quad (16)$$

where

$z_{si}(t)$ – set mode of ETV i^{th} drive (starting, constant speed, braking etc.), $i = 1..p$

In a typical, model cycle of an ETV drive the following phases of motion can be distinguished:

- start-up/ increase of speed ($F > 0$, acceleration $a > 0$),
- ride with constant speed (if possible to be accomplished by a control and locomotive drive system) ($a = 0$),
- coasting ($F = 0$; $a < 0$),
- braking ($a < 0$).

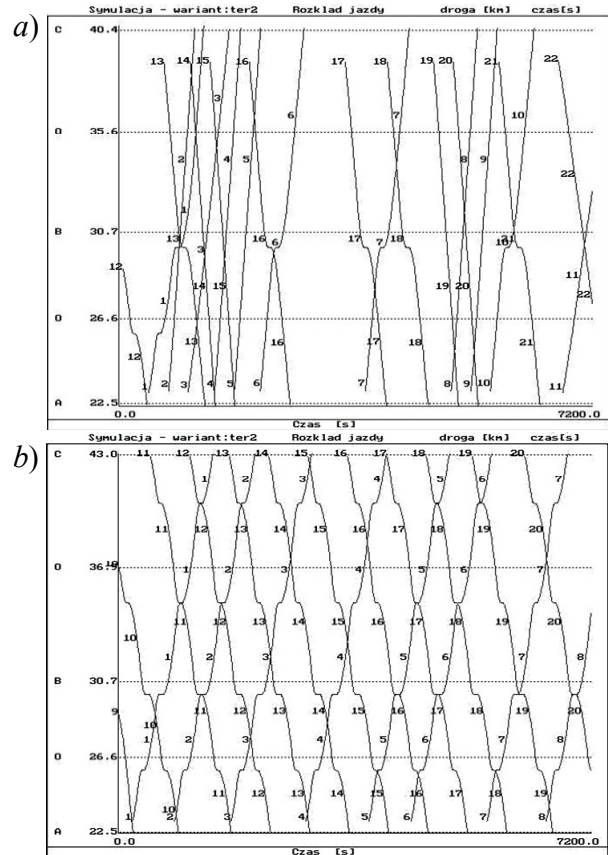


Fig. 6. Different time tables: a) mixed traffic; b) regular suburban traffic

The superior task of the traffic modeling is to keep scheduled time T_{ci} of the ETV running on a section (fig. 6) acc. to the assumed type of traffic with taking into account voltage level and its influence on ETV's traction characteristics (fig. 5). For this purpose, special algorithms are to be developed to recalculate traction characteristics of trains versus voltage and to maintain the desired average speed v_{srz} of ETV, by controlling the instantaneous (at a given time step t_j) ETV speed $v(t_j)$ and comparing it

with the predicted speed (in a given time step, t_j) to obtain the average speed $v_{\text{сп}}(t_j)$ [11, 12, 16].

Conclusions

The presented in the paper formal models of the ERL have been applied in a form of software and implemented for simulation analysis of different 3 kV DC railway systems with a variety of traffic: suburban, mixed passenger and freight, freight,

intercity to assess power demand and energy delivery adequacy of the designed power supply system during different feasibility studies [11-13]. Some exemplary results of application of the derived methods are presented in the paper, showing opportunity for research and design in electric traction created by application of modeling and simulation techniques (fig. 7, 8).

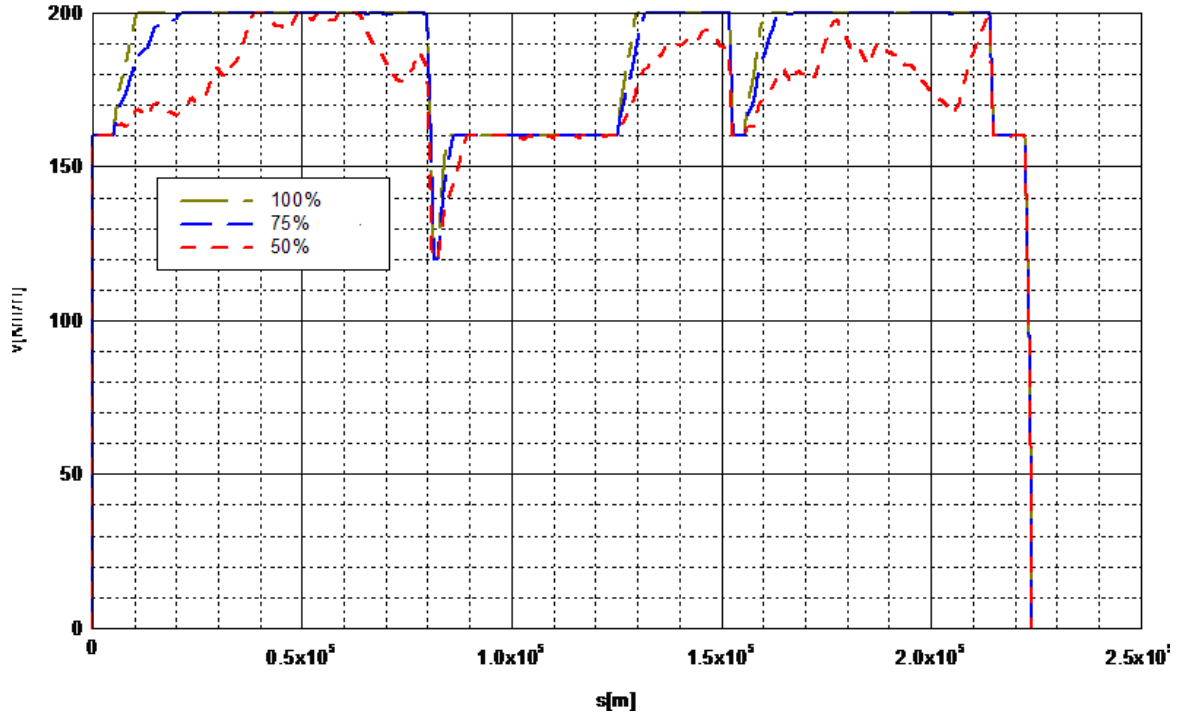


Fig. 7. Speed versus position of 500-t train with 6 MW locomotive acc. to available power (100%, 75% and 50% of nominal) limited by catenary voltage (results of exemplary simulation)

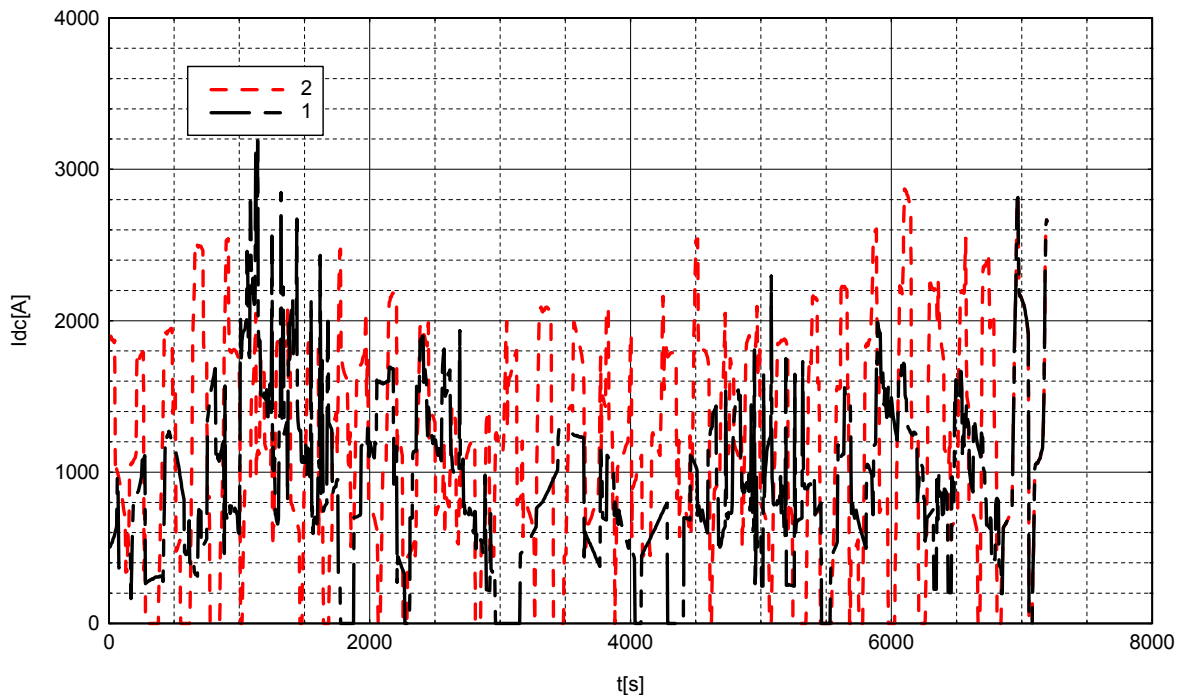


Fig. 8. A 3 kV DC traction substation load current acc. to the type of traffic: 1 – mixed traffic (fig. 6, a); 2 – suburban traffic (fig. 6, b)

REFERENCES

1. Capasso A., Buffarini G.G., Morelli V., Lamedica R. – Supply system characteristics and harmonic penetration studies of the new high speed FS railway line Milan-Rome-Naples. IEE Int. Conf. on Main Line Railway Electrification, York (UK), 1989.
2. Hill R.J., Cai Y. - An efficient computational technique for a DC rail traction power flow simulation incorporating track branches. 6-th Int. Conference on Computational Methods, Italy, May, 1993.
3. Karwowski K., Mizan M. – Zastosowanie programu PSPICE do badań symulacyjnych napędu przekształtnikowego sterowanego mikrokomputerowo. 3rd Int. Scientific Conf. MET'97 „Drives and supply systems for modern electric traction”, Warsaw, 25-27 September 1997.
4. Lewandowski M. Method of calculations of current harmonics in a current taken from 3kV DC network by a traction vehicle with asynchronous drive, *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 270-275, 6/2010.
5. Markvardt K. G. Energosnabzhenije električeskich železnych dorog. Moskva 1982.
6. Mellitt B., Passalacqua R., Sciuotto G.-The Role of CAE Techniques in Traction Systems. State of the Art and Trend. COMPRAIL'92, Rome, Italy, III, 1990.
7. Mouneimne Z., Mellitt B.- Modelling of inverter controlled asynchronous drives for system simulation in DC railways. IEE Proc. Vol 135, Pt B, 5/88, pp. 210-217.
8. Pozzobon P., Sciuotto G. - Advanced Computer Simulation for Analysis and Design of Electrified Transportation Systems: Electric Plants and Drives. COMPRAIL'92, Waszyngton 1992
9. Rawicki S., Nowak M., Róžański M., Wycinka W.: Calculation of energy-saving traffic of tram vehicle with field-oriented control of traction induction motors, *Pojazdy Szynowe*, 3/ 2011.
10. Szelaĝ A., Mierzejewski L. - Ground transportation systems. Chapter in Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering. Volume: Supplement I, John Wiley & Sons, Inc., NY, USA, 1999.
11. Szelaĝ A. - Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik Modelowania i symulacji. *Prace Naukowe PW, Seria ELEKTRYKA*, p.178, 123, 2002.
12. Szelaĝ A. - Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3 kV DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów. Wyd. SPATIUM, Radom, 2013, s. 158.
13. Szelaĝ A., Maciołek T.: A 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand – problems of analysis and synthesis, *Przegląd Elektrotechniczny* 3a(89)/2013.
14. Szelaĝ A., Patoka M. –Issues of low frequency electromagnetic disturbances measurements In traction vehicles equipped with power electronics drive systems *Przegląd Elektrotechniczny* 9/2013, pp. 295-301.
15. Szelaĝ A., Steczek M. “Analysis of input impedance frequency characteristic of electric vehicles with a.c. motors supplied by 3 kV DC system for reducing disturbances in signalling track circuits caused by the harmonics in the vehicle's current”. *Przegląd Elektrotechniczny*, 3a/2013.
16. Szelaĝ, A. Analysis and computer aided modeling and simulation of DC electric traction. *Systems Science* 18.4, 1993.
17. Szelaĝ, A., W. Zajac, Martinez P. M. "Harmonic distortion caused by electric traction vehicles with ac motors fed by DC supply system-CAD analysis." EPE-European Conference on Power Electronics and Applications. Vol. 1. Proceedings. Sevilla, September 1995.
18. Szelaĝ, A., and L. Mierzejewski. "An analysis of disturbances in power utility systems caused by traction rectifier substation." The 5th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and other Advanced Mass Transit Systems, COMPRAIL. Part 2(of 2). 1996.
19. Lewadowski M., Szelaĝ A. Minimizing harmonics of the output voltage of the chopper inverter, *Arch. Elektrotechnik*, vol. 69, pp.223 -226, 1986.
20. Zajac W., Szelaĝ A. Harmonic distortion caused by suburban and underground rolling stock with D.C. motors. CIEP 96, Cuernavaca, Mexico October 1996, pp. 14-17.
21. Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorny M., Szelaĝ A. Quality parameters of electricity supplied to electric railways. *Scientific Letters of the University of Žilina-Communications*, No 2-3/2001.
22. Szelaĝ A. Verification of models applied in simulation analysis of electrified railway lines - Weryfikacja modeli symulacyjnych systemu trakcji elektrycznej prądu stałego MET'99 Fourth International Conference on Drives and Supply Systems for Modern Electric Traction in Integrated XXI Century Europe, pp. 260-269, Warsaw, Poland, 1999.

Received 14.10.2014.

Internal reviewer *Sichenko V. G.*

External reviewer *Sokol E. I.*

The paper presents different aspects and approaches towards application modeling and simulation techniques. It is discussed the different approaches to the modeling of the traction power supply systems. ETS model has presented like a modular structure, and ETS as a complex system can be described by a finite number of subsystems. In this paper, the adopted methodology is considered to be a set of mutually dependent subsystems that simplifies the process of formulation, modification and computer implementation of models. The presented in the paper formal models have been applied in a form of software and implemented for simulation analysis of different 3 kV DC railway systems with a variety of traffic: suburban, mixed passenger and freight, freight, intercity to assess power demand and energy delivery adequacy of the designed power supply system during different feasibility studies. Some exemplary results of application of the derived methods are presented in the paper, showing opportunity for research and design in electric traction created by application of modeling and simulation techniques.

Keywords: electric traction, system, decomposition, modeling, routines, characteristic, time table.

УДК 621.331.3

А. ШЕЛОНГ (ВАРШАВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, ПОЛЬЩА)

Варшавський технологічний університет, Відділ електричної тяги, Площа Політехніки 1, 00-661, Варшава, тел. :+48 22 234-72-17, факс:+48 22 625-75-24, ел. пошта: adam.szelaq@ee.pw.edu.pl

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ І ТЕХНОЛОГІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК МЕТОДІВ ДЛЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОГО ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У даній статті представлені різні аспекти та підходи до створення прикладних моделей і прикладних методів моделювання. Представлено різні підходи до моделювання систем тягового електропостачання. СТЕ представлена як модульна структура, система електропостачання як складна система може бути описана кінцевою кількістю підсистем. У цій роботі прийнята методологія, в якій передбачається, що система електропостачання є поруч взаємно залежних підсистем, що спрощує процес формулювання, формалізації та комп'ютерного представлення моделей. Представлені в статті математичні моделі були реалізовані у формі програмного забезпечення і застосовувалися для аналізу і моделювання різних систем тягового електропостачання постійного струму 3 кВ з безліччю типів руху: приміський, змішаний – пасажирський і вантажний, вантажний, інтерсیتی для оцінки навантажень на систему тягового електропостачання під час різних техніко-економічних обґрунтувань. Стаття містить деякі експериментальні результати застосування методів моделювання, що показують можливості їх застосування для аналізу і проєктування систем електричної тяги.

Ключові слова: електрична тяга, система, декомпозиція, моделювання, процедура, характеристики, розклад руху.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сокол Є. І.*

УДК 621.331.3

А. ШЕЛОНГ (ВАРШАВСЬКИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, ПОЛЬЩА)

Варшавський технологічний університет, Отдел электрической тяги, Площадь Политехники 1, 00-661, Варшава, тел.:+48 22 234-72-17, факс:+48 22 625-75-24, эл. почта: adam.szelaq@ee.pw.edu.pl

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ И ТЕХНОЛОГИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК МЕТОДОВ ДЛЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В данной статье представлены различные аспекты и подходы к созданию прикладных моделей и прикладных методов моделирования. Представлены различные подходы к моделированию систем тягового электроснабжения. СТЕ представлена как модульная структура, система электроснабжения как сложная система может быть описана конечным числом подсистем. В этой работе принята методология, в которой предполагается, что система электроснабжения является рядом взаимно зависимых подсистем, что упрощает процесс формулировки, формализации и компьютерного представления моделей. Представленные в статье математические модели были реализованы в форме программного обеспечения и применялись для анализа и моделирования различных систем тягового электроснабжения постоянного тока 3 кВ со множеством типов движения: пригородное, смешанное – пассажирское и грузовое, грузовое, интерсیتی для оценки нагрузок на систему тягового электроснабжения во время различных технико-экономических обоснований. Статья содержит некоторые экспериментальные результаты применения методов моделирования, показывающие возможности их применения для анализа и проектирования систем электрической тяги.

Ключевые слова: электрическая тяга, система, декомпозиция, моделирование, процедура, характеристика, расписание движения.

Внутренний рецензент *Сыченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сокол Е. И.*

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: arpul@ukr.net

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Введение

Первоочередной технической проблемой освоения растущих объемов пассажирских перевозок и обеспечения конкурентоспособности железнодорожного транспорта есть его техническое переоснащение с целью значительного сокращения времени перемещения пассажиров. Успешное решение этой проблемы невозможно без ввода в эксплуатацию тягового подвижного состава, в частности электровозов, отвечающих современным требованиям, так как пассажирский электроподвижной состав железных дорог Украины, особенно переменного тока, требует обновления. По данным «Укрзалізниці» [1] средний износ парка электровозов составляет 90 %. В 2015 году из инвентарного парка пассажирских электровозов необходимо изъять около 95 % электровозов серии ЧС2 и 75 % – серии ЧС4 у которых закончился срок службы, уже продленный до 45 лет.

Чтобы избежать приобретения малоэффективного подвижного состава, необходима разработка новых подходов к определению основных параметров электровозов – скорости и мощности номинального режима.

Постановка и решение задачи определения параметров электровозов

Для выполнения указанной выше проблемы требуется решение следующих задач:

- определение рациональных значений основных внешних параметров электровоза для вождения поездов на конкретном направлении при заданной их составности и технической скорости движения;

- определение оптимальной градации мощности парка электровозов для обеспечения пассажирских перевозок на заданном полигоне тяги.

В настоящей работе будет рассмотрено решение первой задачи. В качестве критерия оптимальности при выборе основных параметров электровоза следует принять минимум расхода электроэнергии на осуществление перевозок при заданном времени движения поездов. Та-

кой подход представляется оправданным, поскольку затраты на электроэнергию составляют существенную долю эксплуатационных расходов железных дорог.

Используя единицы измерения физических величин, регламентированные правилами тяговых расчетов [2], мощность номинального режима пассажирского электровоза определим как

$$N_H = 2,725 k_N F_{кп} v_{п}, \text{ Вт} \quad (1)$$

где $F_{кп}$ – среднее значение предельной силы тяги электровоза в период пуска (пусковая сила тяги);

$v_{п}$ – скорость выхода на характеристику номинального напряжения (пусковая скорость);

k_N – коэффициент, равный отношению мощности продолжительного режима к мощности, соответствующей выходу на пусковую скорость. Как показано в [2]

$$k_N = 1 / (k_f k_v), \quad (2)$$

где k_f – отношение пусковой силы тяги к силе тяги продолжительного режима;

k_v – отношение пусковой скорости к скорости продолжительного режима.

Необходимое значение пусковой силы тяги, а значит и мощности номинального режима, следует определять так, чтобы обеспечить возможность реализации в момент выхода на пусковую скорость заданной величины ускорения $a_{п}$. Сформулированному условию соответствует сила тяги

$$F_{кп} = (P + Q) [w_{оп} + 102(1 + \gamma)a_{п}], \quad (3)$$

где P, Q – масса электровоза и состава, соответственно;

$w_{оп}$ – основное удельное сопротивление движению поезда в режиме тяги при пусковой скорости;

$(1 + \gamma)$ – коэффициент инерции вращающихся масс;

a_{Π} – значение ускорения при достижении пусковой скорости и движении поезда на площадке (на основании [4 – 7] может быть принято равным $0,3 \dots 0,4 \text{ м/с}^2$).

В выражении (3) фигурирует масса электроваза P . Ее целесообразно определить из условия реализации требуемой величины $F_{\text{кп}}$ при заданном расчетном коэффициенте сцепления при пусковой скорости $\psi_{\text{кп}}$, т.е. из равенства

$$F_{\text{кп}} = 1000 P \psi_{\text{кп}}. \quad (4)$$

Для удобства производимых расчетов введем коэффициент

$$k_p = \frac{P}{Q}, \quad (5)$$

который, приравняв правые части (3) и (4) и учитывая, что

$$w_{\text{оп}} = \frac{P w'_{\text{оп}} + Q (w''_{\text{оп}} + w_{\text{пг}})}{P + Q},$$

получим в виде

$$k_p = \frac{w''_{\text{оп}} + w_{\text{пг}} + 102 a_{\Pi} (1 + \gamma)}{1000 \psi_{\text{кп}} - [w'_{\text{оп}} + 102 a_{\Pi} (1 + \gamma)]}, \quad (6)$$

где $w'_{\text{оп}}$, $w''_{\text{оп}}$ – основное удельное сопротивление движению при пусковой скорости, соответственно локомотива в режиме тяги и состава;

$w_{\text{пг}}$ – дополнительное удельное сопротивление движению состава от подвагонных генераторов [2].

С учетом (5) выражение (3) приведем к виду

$$F_{\text{кп}} = (1 + k_p) [w_{\text{оп}} + 102 (1 + \gamma) a_{\Pi}] Q. \quad (7)$$

Анализ выражения (6) показал, что основными параметрами, определяющими величину k_p , являются пусковая скорость v_{Π} и ускорение при пуске a_{Π} . Значение k_p не зависит от величины уклона, так как задача решается, исходя из условия реализации заданного пускового ускорения на площадке [3]. С достаточной для практических расчетов точностью зависимость $k_p(v_{\Pi}, a_{\Pi})$, определяемую выражением (6), можно аппроксимировать трехчленом вида

$$k_p = b_0 + b_1 v_{\Pi} + b_2 a_{\Pi}^2, \quad (8)$$

где v_{Π} – значение пусковой скорости, км/ч;

a_{Π} – значение пускового ускорения, м/с^2 ;

b_0, b_1, b_2 – коэффициенты аппроксимации, значения которых приведены в табл. 1.

Согласно (1) при заданной силе тяги $F_{\text{кп}}$ мощность номинального режима является функцией пусковой скорости. Ее значение определяется исходя из принятых выше критериев оптимизации.

Анализ выражения (1) показывает, что мощность пассажирского электроваза при заданной массе поезда определяется, главным образом, величиной пусковой скорости. Следовательно, определение оптимальной мощности локомотива сводится к установлению оптимального значения пусковой скорости $v_{\Pi(\text{opt})}$.

Для решения задачи воспользуемся предложенным в [8] подходом к определению пусковой скорости пассажирских электровазов.

Решение данной задачи предполагает выполнение следующей процедуры:

– для ряда заданных значений пусковой скорости определяются предельные тяговые характеристики электроваза [3];

– для принятых значений пусковой скорости v_{Π} на основании тяговых расчетов определяется зависимость минимального расхода электроэнергии от заданной величины технической скорости [8];

– по $a_{\min}(v_{\text{T}}, v_{\Pi})$ определяется зависимость оптимальной пусковой скорости $v_{\Pi(\text{opt})}$ соответствующей минимуму расхода электроэнергии на тягу и соответственно мощности номинального режима от технической скорости.

Установленные зависимости $v_{\Pi(\text{opt})}(v_{\text{T}})$ и $N_{\text{н}(\text{opt})}(v_{\text{T}})$ характеризуют конкретный участок железнодорожной линии и не зависят от составности поезда. Докажем это утверждение.

Уравнение движения поезда представим в виде [3]

$$v \frac{dv}{ds} = \xi (f_{\text{к}}(v) - b_{\text{к}}(v) - w_{\text{о}}(v) - i(s)), \quad (9)$$

где ξ – размерный коэффициент, значение которого зависит от принятых единиц измерения физических величин;

$w_{\text{о}}$ – удельное основное сопротивление движению поезда;

$f_{\text{к}}$ – удельная сила тяги электроваза;

$b_{\text{к}}$ – удельная тормозная сила поезда;

$i(s)$ – продольный профиль железнодорожной линии.

Область определения управляющих параметров $b_k(v)$, $f_k(v)$ и $w_0(v)$ можно установить следующим образом.

Тормозная сила поезда может принимать следующие значения

$$0 \leq b_k \leq \bar{b}_k, \quad (10)$$

где \bar{b}_k – предельное значение тормозной силы [2]

$$\bar{b}_k = 1000 \vartheta_p \varphi_{кр}, \quad (11)$$

где ϑ_p – расчетный тормозной коэффициент, определяемый действующими тормозными нормативами;

$\varphi_{кр}$ – расчетный коэффициент трения тормозных колодок.

Сила тяги электровоза удовлетворяет условию

$$0 \leq f_k(v) \leq \bar{f}_k(v), \quad (12)$$

где $\bar{f}_k(v)$ – представляет собой предельную тяговую характеристику электровоза в

удельных единицах. Как показано в [3], $\bar{f}_k(v)$ можно определить с помощью выражений приведенных в табл. 2 для определения координат предельной тяговой характеристики электровозов с коллекторными ТЭД и с асинхронными ТЭД, имеющим три зоны регулирования скорости:

- зона пуска – $0 \leq v \leq v_{\Pi}$;
- зона поддержания постоянной мощности – $v_{\Pi} \leq v \leq v_{\alpha}$;
- зона «серийной» характеристики – $v_{\alpha} \leq v \leq v_k$.

Отметим, что в ЭПС с асинхронными ТЭД может использоваться и две зоны регулирования, например электровозы ДСЗ и ЭП10.

Приведенные в табл. 2 выражения подтверждают высказанное выше утверждение о независимости оптимального значения пусковой скорости от массы поезда, поскольку не содержат в качестве переменных массу состава и локомотива.

Таблица 1

Значения коэффициентов в выражении (8)

Тип ЭПС	b_0	b_1	b_2	Объясняемый разброс
Постоянного тока	-0,061	0,0022	1,0146	98,2
Переменного тока	-0,044	0,0019	0,8171	98,1
С асинхронными ТЭД	0,009	0,0011	0,5704	98,7

Таблица 2

Координаты предельной тяговой характеристики

Интервал скоростей	Тип ЭПС	
	с асинхронными ТЭД	с коллекторными ТЭД
$0 \leq v_{\Pi}$	$\bar{f}_{кп} = w_{оп} + i + 102 a_{\Pi} (1 + \gamma)$	
$v_{\Pi} \leq v_{\alpha}$	$\bar{f}_k(v) = \bar{f}_{кп} \frac{v_{\Pi}}{v}$	
$v_{\alpha} \leq v_k$	$\bar{f}_k(v) = \bar{f}_{кп} \frac{v_{\Pi}^2}{v^2}$	$\bar{f}_k(v) = F_k^* \left(k_v \frac{v}{v_{\Pi}} \right) \frac{\bar{f}_{кп}}{k_f \beta_{\min}}$

В данной работе рассмотренная задача решена применительно к электровозам с асинхронным тяговым приводом, учитывая его перспективность.

Для выработки рекомендаций по выбору удельной мощности и скорости номинального режима перспективных пассажирских электровозов для железных дорог Украины были выполнены соответствующие расчеты для участков, электрифицированных на переменном (Юго-Западная, Одесская, Львовская ж.д.) и

постоянном (Приднепровская, Южная, Донецкая ж.д.) токе.

Расчеты выполнены для реального продольного профиля участка при следующих исходных данных:

- ускорение поезда на площадке в период разгона – не ниже $0,3 \text{ м/с}^2$;
- остаточное ускорение поезда на площадке при достижении конструкционной скорости – $0,05 \text{ м/с}^2$;

- реализуемая на наитруднейшем подъеме скорость движения поезда – не ниже пусковой;
- конструкционная скорость электровоза – 160 км/ч;
- ограничения максимальной скорости движения на участке – 160 км/ч.

Остановимся подробнее на анализе полученных результатов.

Следует отметить, что каждый участок характеризует «своя» зависимость $v_{п(опт)}(v_{т})$, поскольку характер этих зависимостей определяется спецификой конкретного участка (характеристики продольного профиля, установленные ограничения скорости, расстояния между отдельными пунктами и т.д.). Таким образом, одному и тому же значению технической скорости на различных участках соответствуют отличающиеся значения $v_{п(опт)}$. Сказанное наглядно иллюстрируется графиками рис. 1.

Вместе с тем на полигоне тяги, обслуживаемом тяговыми средствами одного или нескольких локомотивных депо, экономически невыгодно вводить в эксплуатацию разнотипные электровозы. Поэтому для железных дорог Украины следует выбрать пусковую скорость для полигона тяги на постоянном и переменном токе из условия возможности реализации заданной технической скорости на каждом участке полигона, т.е. как

$$v_{п(опт)} = \max \left\{ v_{п(опт) i} (v_{т i}) \mid v_{т i} = v_{т 3} \right\}, \quad (13)$$

$$i = \overline{1, k},$$

где $v_{т 3}$ – заданная величина технической скорости;

k – количество участков обращения полигона тяги.

Выражение (13) представляет правило выбора лимитирующего участка на полигоне тяги, т.е. такого перегона на котором при одинаковых ограничениях скорости движения заданный уровень технической скорости реализуется при наибольшей удельной мощности электровоза, а приведенные на рис. 1 зависимости следует рассматривать как рекомендации при выборе номинальной мощности перспективных электровозов.

На основании предложенной в [3, 8] методики разработаны рекомендации по выбору параметров номинального режима перспективных пассажирских электровозов с асинхронными тяговыми двигателями для железных дорог Украины.

Для расчетов, в качестве базового варианта, принят участок Днепропетровск – Киев. Выполнено три варианта расчетов при различном сочетании ограничений максимальной скорости движения, представленных в табл. 3.

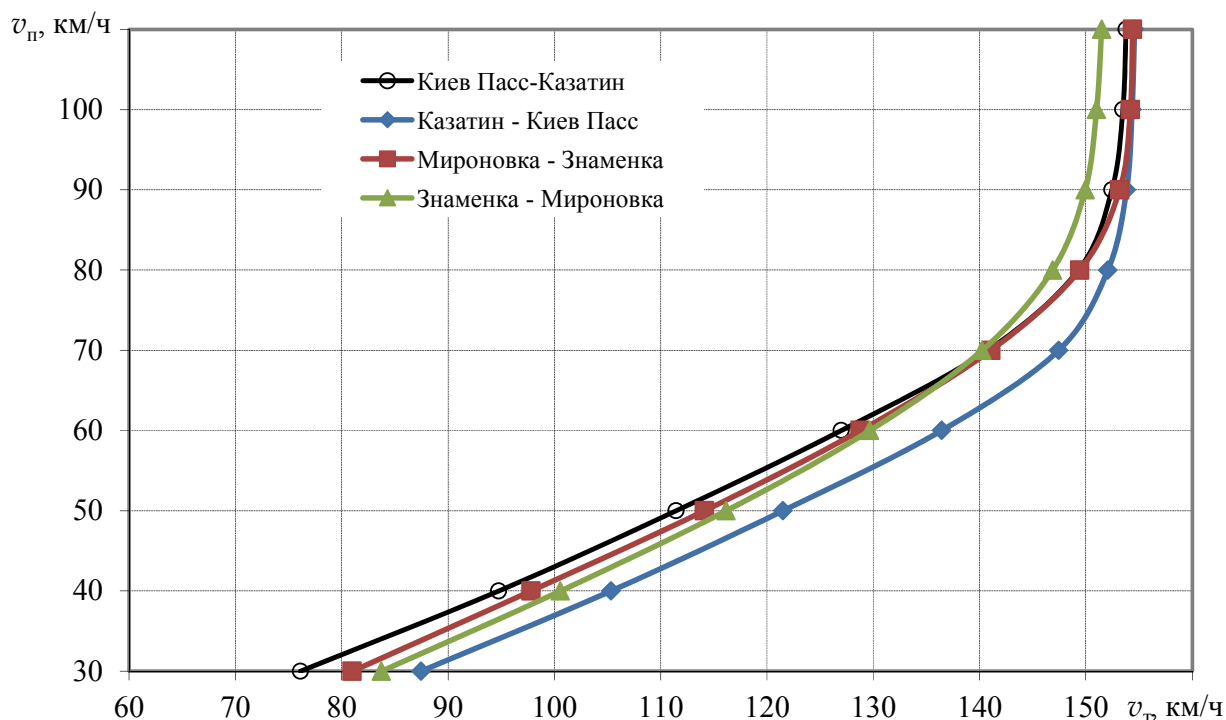


Рис. 1. Зависимость оптимальной пусковой скорости от технической скорости на участках Юго-Западной железной дороги

Варианты распределения по удельному весу ограничений скорости на участке Днепропетровск – Киев

Ограничение скорости, км/ч	Относительная длина ограничения скорости, %		
	вариант распределения ограничений		
	1	2	3
100	40	40	–
110	10	10	–
120	10	–	40
130	10	–	10
140	30	50	10
150	–	–	10
160	–	–	30

Результаты расчетов пусковой скорости и удельной мощности электровозов с асинхронным тяговым приводом для различных ограничений скорости представлены на рис. 2 и 3 кривыми 1 – 3.

Горизонтальные линии на указанных рисунках соответствуют минимальным значениям пусковой скорости и удельной мощности тяги, при которых возможна реализация конструкционной скорости электровоза при движении на горизонтальном участке пути, т.е. значения, ниже которых не обеспечивается реализация заданной величины остаточного ускорения.

Из приведенных на рис. 2 зависимостей $v_{п(опт)}(v_T)$ также видно, что при первом варианте ограничений может быть реализована техническая скорость немногим больше 110 км/ч. При этом, для организации движения нужен электровоз, номинальный режим которого определяют скорость 60 км/ч и удельная мощность 6,9 кВт/т (точка на кривой первого варианта), что соответствует минимально возможным значениям по величине остаточного ускорения, а наращивание удельной мощности не

обеспечивает повышения технической скорости движения.

Повышение технической скорости движения пассажирских поездов сверх 110 км/ч возможно только при увеличении максимально допустимой скорости движения на участке.

В качестве возможных рассмотрены два варианта, показанные в табл. 3:

- вариант 2 – повышение максимальной скорости движения до 140 км/ч на участках, где скорость движения ограничена величиной 120 и 130 км/ч. В этом случае относительная длина участков с допускаемой скоростью 140 км/ч возрастает до 50 % общей протяженности;

- вариант 3 – повышение максимальных скоростей движения на всех элементах профиля на 20 км/ч. В этом случае максимальная скорость движения на 30 % протяженности участка достигнет отметки 160 км/ч.

Расчеты показали, что второй вариант не дает существенного увеличения технической скорости, а в третьем варианте достигается увеличение технической скорости до значения 130 км/ч при увеличении необходимой мощности электровоза (точка на кривой третьего варианта).

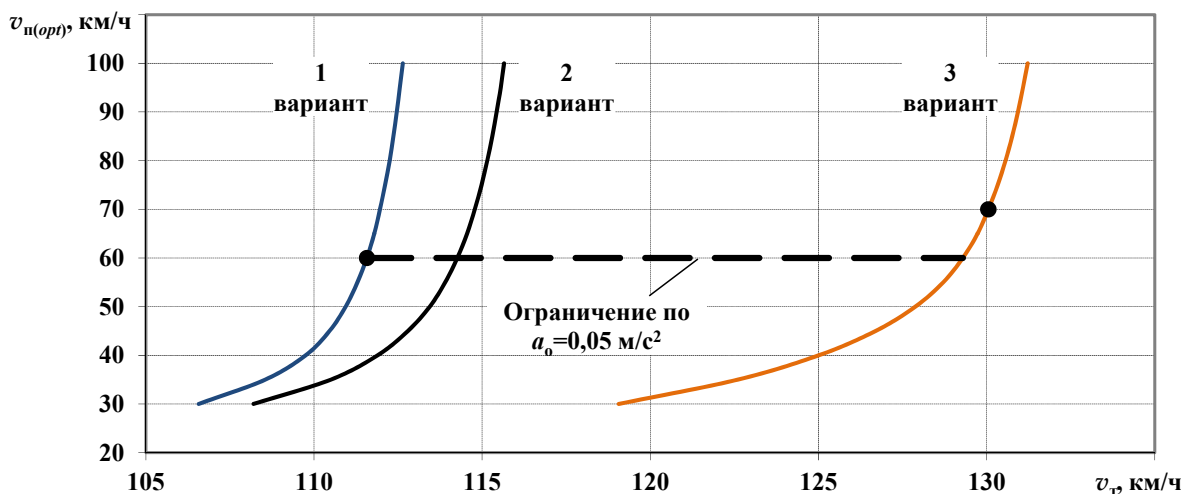


Рис. 2. Оптимальная пусковая скорость пассажирского электровоза с асинхронным тяговым приводом

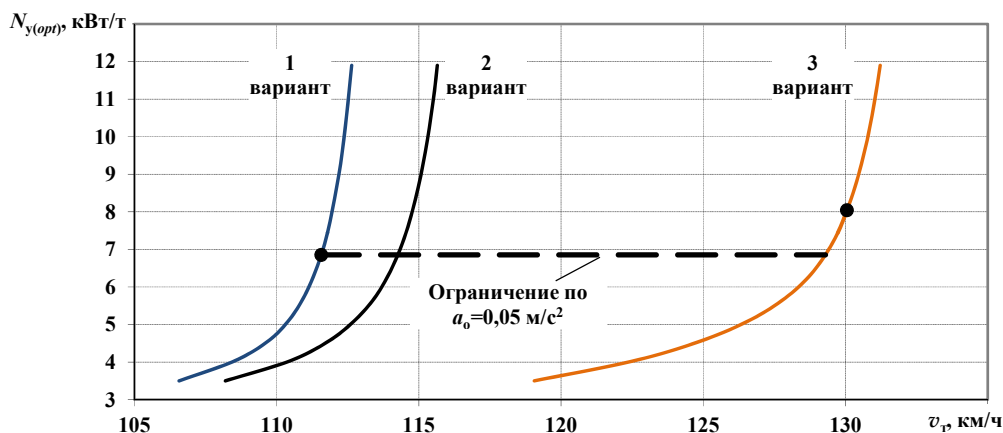


Рис. 3. Оптимальная удельная мощность номинального режима пассажирского электровоза с асинхронным тяговым приводом

Выводы

На основании выполненных исследований показано, что для каждой железнодорожной линии существует зависимость оптимальных значений пусковой скорости от величины потребной технической скорости движения, которая может

быть использована для определения оптимальной скорости номинального режима электровоза.

Анализ результатов выполненных тяговых расчетов позволил установить, что пусковая скорость перспективных пассажирских электровозов с асинхронными ТЭД может быть принята равной 70 км/ч, а удельная мощность тяги 8,0 кВт/т.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сергиенко Н. И. Решение проблем подвижного состава железных дорог Украины через взаимодействие государственного и частного секторов экономики / Н. И. Сергиенко // Локомотив-информ. – 2010. – №6. – С. 40-46.
2. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
3. Арпуль С. В. Определение силы тяги пассажирского электровоза при решении задач тягового обеспечения / С. В. Арпуль // Электрификация транспорта, № 5. – 2013. – С. 8-11.
4. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах). Под ред. Колодяжного Н. В. – М.: Транспорт, 1976. – 416 с.
5. Бещева Н. И. Местное пассажирское движение на электрифицированных линиях / Н. И. Бещева. – М.: Транспорт, 1965. – 224 с.
6. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / Под ред. А. И. Тищенко. Т.1. – М.: Транспорт, 1976. – 432 с.
7. Исследование высокоскоростного электропоезда ЭР200 / Под ред. В. Г. Иноземцева. Сб. науч. тр. – М.: Транспорт, 1985. – 83 с.
8. Арпуль С. В. Определение скорости движения и удельной мощности номинального режима пассажирских электровозов / С. В. Арпуль // Электрификация транспорта, № 7. – 2014. – С. 107-113.

REFERENCES

1. Sergienko N. I. Reshenie problem podvizhnogo sostava zheleznykh dorog Ukrainy cherez vzaimodeystvie gosudarstvennogo i chastnogo sektorov ekonomiki [The solution of the problems of the rolling stock of Railways Ukraine through the interaction of public and private sectors of economy] / N. I. Sergienko // Lokomotiv-inform. – 2010. – №6. – pp. 40-46.
2. Pravila tiagovykh raschetov dlia poezdnoi raboty [Rules traction calculations for train operation]. – М.: Transport, 1985. – 287 p.
3. Arpul S. V. Opredelenie sily tiagi passazhirskogo elektrovoza pri reshenii zadach tiagovogo obespecheniia [Definition traction control passenger locomotive when solving problems traction software] / S. V. Arpul // Elektrifikatsiia transporta, № 5. – 2013. – pp. 8-11.
4. Vysokoskorostnoe passazhirskoe dvizhenie (na zheleznykh dorogakh) [High-speed passenger traffic (Railways)] Pod red. Kolodiazhnogo N. V. – М.: Transport, 1976. – 416 p.
5. Beshcheva N. I. Mestnoe passazhirskoe dvizhenie na elektrifitsirovannykh liniakh [Local passenger traffic on electrified lines] / N. I. Beshcheva. – М.: Transport, 1965. – 224 p.
6. Spravochnik po elektropodvizhnomu sostavu, teplovozam i dizel-poezdam [Handbook of the electric rolling stock, diesel locomotives and diesel trains] / Pod red. A. I. Tishchenko. V.1. – М.: Transport, 1976. – 432 p.
7. Issledovanie vysokoskorostnogo elektropoezda ER200 [The study of high-speed trains] / Pod red. V. G. Inozemteva. Sb. науч. tr. – М.: Transport, 1985. – 83 p.
8. Arpul S. V. Opredelenie skorosti dvizheniia i udelnoi moshchnosti nominalnogo rezhima passazhirskikh elektrovozov [The definition of speed and power density nominal mode of passenger electric locomotives] /S. V. Arpul // Elektrifikatsiia transporta, № 7. – 2014. – pp. 107-113.

Поступила в печать 19.11.2014.

Ключевые слова: скорость номинального режима, ускоряющая сила, удельная номинальная мощность, основное удельное сопротивление движению, удельная мощность электровоза.

Внешний рецензент Панасенко Н. В.

Внутренний рецензент Гетьман Г. К.

Приведены результаты определения рациональных параметров номинального режима электроподвижного состава для вождения пассажирских поездов при заданной их составности и технической скорости движения. В работе указано, что для обновления парка электровозов необходимо решение двух отдельных задач: определение рациональных значений основных внешних параметров электровоза для вождения поездов на конкретном направлении при заданной их составности и технической скорости движения; определение оптимальной градации мощности парка электровозов для обеспечения пассажирских перевозок на заданном полигоне тяги.

В данной работе приведены результаты, касающиеся выбора рациональных параметров электровозов. Установлены критерии, определяющие оптимальные значения параметров электровозов для пассажирского движения. Установлено, что номинальная мощность электровоза при регламентированной величине пускового ускорения, характеристиках продольного профиля железнодорожного пути, известном типе тягового привода и установленной составности поезда, однозначно определяется величиной пусковой скорости, поэтому задача определения оптимальных параметров номинального режима пассажирского электровоза сводится к определению оптимального значения пусковой скорости. В работе приведены рекомендации по выбору параметров номинального режима для пассажирских электровозов с асинхронным приводом.

УДК 656.224.022.846

С. В. АРПУЛЬ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: arpul@ukr.net

ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ

Наведено результати визначення раціональних параметрів номінального режиму електрорухомого складу для обслуговування пасажирських поїздів при заданій їх масі та технічній швидкості руху.

У роботі зазначено, що для оновлення парку електровозів необхідно вирішення двох окремих задач: визначення раціональних значень основних зовнішніх параметрів електровоза для обслуговування поїздів на конкретному напрямку при заданій їх масі та технічній швидкості руху; визначення оптимальної градаци потужності парку електровозів для забезпечення пасажирських перевезень на заданому полігоні тяги.

В даній роботі наведено результати, що стосуються вибору раціональних параметрів електровозів. Встановлено критерії, що визначають оптимальні значення параметрів електровозів для пасажирського руху. Встановлено, що номінальна потужність електровоза при регламентованій величині пускового прискорення, характеристиках поздовжнього профілю залізничної колії, відомому типі тягового привода і встановленій масі поїзда, однозначно визначається величиною пускової швидкості, тому задача визначення оптимальних параметрів номінального режиму пасажирського електровоза зводиться до визначення оптимального значення пускової швидкості. У роботі наведено рекомендації щодо вибору параметрів номінального режиму для пасажирських електровозів з асинхронним приводом.

Ключові слова: швидкість номінального режиму, прискорююча сила, питома номінальна потужність, основний питомий опір руху, питома потужність електровоза.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 656.224.022.846

S. V. ARPUL (DNURT)

Department of electric rolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: arpul@ukr.net

THE CHOICE OF RATIONAL PARAMETERS OF THE TRACTION ELECTRIC ROLLING STOCK

The results of the determination of rational parameters of the nominal mode of the electric rolling stock for driving passenger trains at specified their trains and technical speed.

In the paper indicated that for upgrading the fleet of locomotives requires solving two separate problems: the definition of rational values of the main external parameters of the locomotive to drive trains in a specific direction at a given their trains and technical speed; determining an optimal gradation power electric locomotives for passenger traffic on the specified polygon thrust.

In this paper we present the results regarding the choice of rational parameters of electric locomotives. Established criteria that determine the optimal values of parameters of electric locomotives for passenger traffic. It is established that the nominal power of the locomotive when the regulated value of the starting acceleration characteristics of the longitudinal profile of the railway track, a known type of traction drive and installed trains train, is uniquely determined by the value of the starting speed, so the problem of determining the optimal parameters of the nominal mode of passenger locomotive is reduced to the determination of the optimal values of the starting speed. The paper contains recommendations on the choice of parameters in the nominal mode for passenger locomotives with asynchronous drive.

Keywords: speed rated mode, accelerating power unit rated power of the main specific resistance movement, the power density of the electric locomotive.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

© Арпуль С. В., 2014

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроподвижной состав железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 373-15-31, эл. почта: afanasof@ukr.net

РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕБАЛАНСНОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ВЗАИМНО НАГРУЖЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМАШИН ПОСТОЯННОГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТОКА

Введение

Требования соответствующих стандартов и правил ремонта тягового и мотор-вагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта предусматривают проведение приёмо-сдаточных испытаний каждой вновь изготовленной или вышедшей из ремонта тяговой электромашин [4, 9]. Эти испытания представляют собой важную и неотъемлемую часть технологического процесса изготовления или ремонта электромашин, материальные затраты на которую входят в себестоимость конечной продукции. Испытания на нагрев, проверка частоты вращения и реверсирования, а также проверка коммутации требуют обязательного нагружения тяговых электромашин.

Высокую энергетическую эффективность при относительно невысокой суммарной мощности источников питания обеспечивают системы взаимного нагружения, в которых происходит энергообмен между испытываемыми электромашин [5, 7, 8, 10]. Источники внешнего питания в таких системах нагружения требуются только для покрытия потерь мощности в испытываемых электромашин.

Покрытие отдельных видов потерь мощности в системах взаимного нагружения может осуществляться как прямыми, так и косвенными методами, при использовании косвенных способов покрытие потерь обеспечивается за счёт небалансной электромагнитной мощности испытываемых электромашин, которая может создаваться либо за счёт разности их электромагнитных моментов, либо за счёт разности электродвижущих сил электромашин [1, 2].

Целью данной работы является определение принципов регулирования небалансной электродвижущей силы взаимно нагруженных электрических машин тягового и моторвагонного подвижного состава магистрального и промышленного транспорта.

Методика

Небалансная электромагнитная мощность взаимно нагруженных электрических машин

постоянного и пульсирующего тока может быть представлена в виде разности [2]

$$\Delta P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{ЭМГ}} - P_{\text{ЭМД}},$$

где $P_{\text{ЭМГ}}$, $P_{\text{ЭМД}}$ – электромагнитные мощности испытываемых генератора и двигателя соответственно [3, 6].

$$P_{\text{ЭМГ}} = c\Phi_{\text{Г}}\omega_{\text{Г}}I_{\text{Г}}, \quad P_{\text{ЭМД}} = c\Phi_{\text{Д}}\omega_{\text{Д}}I_{\text{Д}},$$

где c – конструктивная постоянная однотипных испытываемых электромашин;

$\Phi_{\text{Г}}$, $\Phi_{\text{Д}}$ – магнитные потоки генератора и двигателя соответственно;

$\omega_{\text{Г}}$, $\omega_{\text{Д}}$ – угловые скорости вращения якорей генератора и двигателя соответственно;

$I_{\text{Г}}$, $I_{\text{Д}}$ – токи якорей генератора и двигателя соответственно.

Путем изменения $\Delta P_{\text{ЭМ}}$ в системах взаимного нагружения с механическим способом покрытия электрических потерь осуществляется регулирование тока нагрузки испытываемых электромашин.

Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения электромашин, позволяющая реализовать варианты механического способа покрытия электрических потерь, представлена на рис. 1 [1]. На данной схеме: M – обмотки электромашин, испытываемой в режиме двигателя; G – обмотки электромашин, испытываемой в режиме генератора; ПМ – преобразователь механической мощности; К – конвертор напряжения (тока).

Преобразователь механической мощности может включать в себя источник механического момента, источник угловой скорости, конвертор механического момента (угловой скорости) [1]. Первый и второй из названных устройств являются активными элементами (источниками мощности), третий – пассивным. Наличие хотя бы одного из активных элементов – обязательно для обеспечения взаимного нагружения электромашин. Конвертор напряжения «К» осуществляет трансформацию напряжения генератора $U_{\text{Г}}$ в напряжение на

двигателе U_d с коэффициентом передачи напряжения k_U . Обмотки возбуждения генератора G и двигателя M запитываются токами $i_{вГ}$ и $i_{вД}$ соответственно.

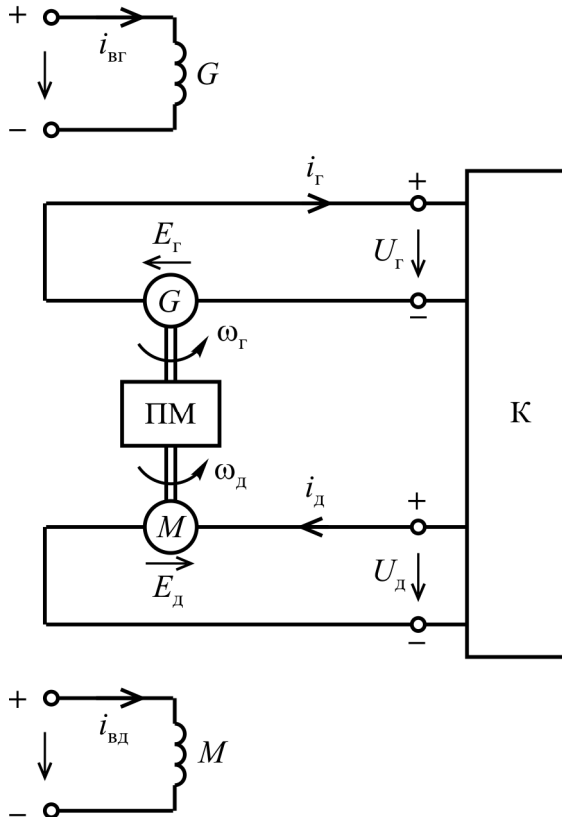


Рис. 1. Обобщенная универсальная схема системы взаимного нагружения

При механическом способе компенсации электрических потерь [1] регулирование небалансной электромагнитной мощности $\Delta P_{эм}$ сводится к регулированию небалансной э. д. с. ΔE и, как следствие, тока I_Γ . Эти параметры связаны между собой уравнением [2]

$$\Delta E = I_\Gamma R_\Sigma + L_\Sigma \frac{di_\Gamma}{dt},$$

где R_Σ , L_Σ – эквивалентные, приведенные к цепи генератора активное сопротивление и индуктивность электрического контура соответственно.

Структурная схема регулирования тока I_Γ представлена на рис. 2.

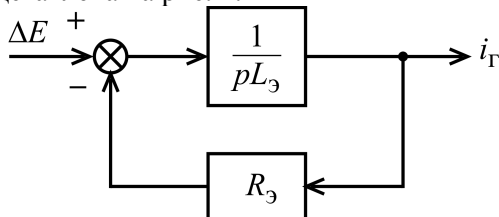


Рис. 2. Структурная схема регулирования тока

В стационарном режиме

$$I_\Gamma = \frac{\Delta E}{R_\Sigma}.$$

В общем виде небалансная э. д. с. может быть представлена как

$$\Delta E = E_\Gamma - E'_d, \quad (1)$$

где E_Γ , E'_d – э. д. с. генератора и приведенная э. д. с. двигателя соответственно.

Приведенное значение э. д. с. двигателя в общем виде может быть выражено как

$$E'_d = \frac{E_d}{k_U},$$

где E_d – э. д. с. испытуемого двигателя.

$$E_\Gamma = c\Phi_\Gamma\omega_\Gamma; E_d = c\Phi_d\omega_d.$$

Учитывая то, что создание небалансной э. д. с. используется для покрытия электрических потерь источником механической мощности [2], можно считать, что ΔE по формуле (1) всегда положительна.

Выразив э. д. с. генератора и двигателя через магнитные потоки и угловые скорости, после преобразований получим

$$\Delta E = c \left(\Phi_\Gamma\omega_\Gamma - \frac{1}{k_U}\Phi_d\omega_d \right), \quad (2)$$

Рассмотрим возможные способы регулирования величины ΔE изменением параметров преобразователей системы взаимного нагружения.

В качестве параметров, определяющих величину ΔE , будем рассматривать: разность магнитных потоков $\Delta\Phi$, разность угловых скоростей $\Delta\omega$ и коэффициент передачи напряжения конвертора k_U [2].

Данные параметры определяются выражениями:

$$\Delta\Phi = \Phi_\Gamma - \Phi_d, \Delta\omega = \omega_\Gamma - \omega_d; k_U = \frac{U_d}{U_\Gamma},$$

где U_d и U_Γ – напряжения на испытуемом двигателе и генераторе соответственно.

Уравнение баланса напряжений в статическом режиме для всех схем с таким способом покрытия электрических потерь будет иметь вид

$$\Delta E = \sum \Delta U,$$

где $\sum \Delta U$ – суммарное падение напряжения в контуре тока нагрузки испытуемых электромашин.

Проведём анализ характера регулирования небалансной э. д. с. изменением каждого из упомянутых параметров отдельно.

Результаты

Рассмотрим вариант регулирования ΔE путём изменения разности магнитных потоков, при котором:

$$\begin{cases} \Delta\omega = 0; \\ k_U = 1; \\ \Delta\Phi = var. \end{cases}$$

Тогда выражение (2) может быть преобразовано к виду

$$\Delta E = c\Delta\Phi \cdot \omega.$$

При постоянной частоте вращения испытуемых электромашин ($\omega = const$) зависимость $\Delta E(\Delta\Phi)$ является прямо пропорциональной.

Графически характер зависимостей $\Delta E(\Delta\Phi)$ при различных значениях стабилизированной угловой скорости ω приведен на рис. 3.

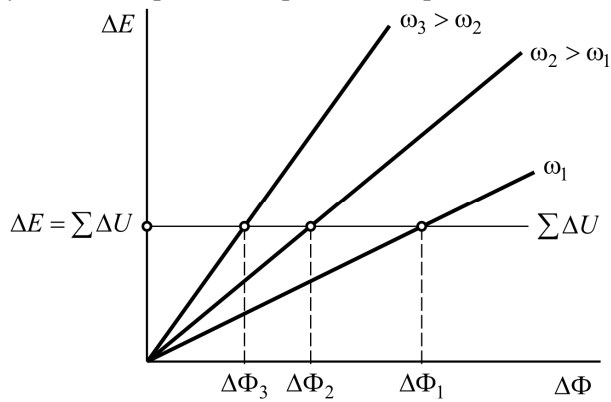


Рис. 3. Характер зависимостей $\Delta E(\Delta\Phi)$

Из рис. 3 видно, что при большем значении угловой скорости ω для компенсации заданного значения $\Sigma\Delta U$ требуется меньшее значение разности магнитных потоков $\Delta\Phi$.

$$\Delta\Phi_3 < \Delta\Phi_2 < \Delta\Phi_1.$$

Рассмотрим вариант регулирования ΔE путём изменения разности угловых скоростей, при котором:

$$\begin{cases} k_U = 1; \\ \Delta\Phi \neq 0; \\ \Delta\omega = var. \end{cases}$$

В данном варианте принято условие $\Delta\Phi \neq 0$. Отметим, что в реальных условиях достаточно часто наблюдается расхождение магнитных характеристик испытуемых электромашин и условие $\Delta\Phi = 0$ является частным для любого варианта регулирования режимом взаимного нагружения.

Тогда выражение (2) может быть записано в виде

$$\Delta E = c(\Phi_{Г}\omega_{Г} - \Phi_{Д}\omega_{Д}).$$

После преобразования это же выражение можно записать в двух видах:

$$\Delta E = c(\Phi_{Г} \cdot \Delta\omega + \Delta\Phi \cdot \omega_{Д});$$

$$\Delta E = c(\Delta\Phi\omega_{Г} + \Phi_{Д}\Delta\omega).$$

Для случая совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин ($\Phi_{Д} = \Phi_{Г}$)

$$\Delta E = c\Phi\Delta\omega.$$

Графически характеристики $\Delta E(\Delta\omega)$ для условия $\Phi = const$ и $\Delta\Phi = 0$ представлены на рис. 4.

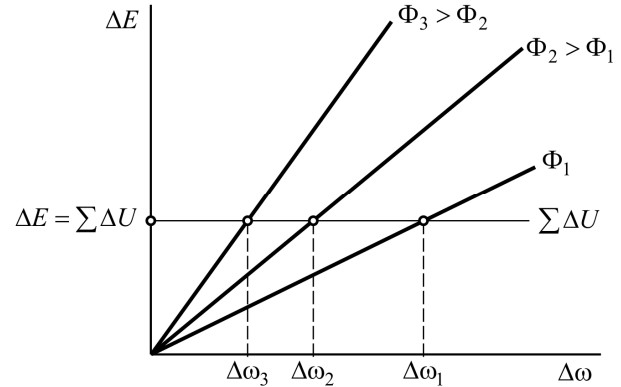


Рис. 4. Характер зависимости $\Delta E(\Delta\omega)$ для $\Delta\Phi = 0$

При $\Delta\Phi = 0$ зависимость $\Delta E(\Delta\omega)$ – прямо пропорциональна. При $\Delta\Phi \neq 0$ зависимость $\Delta E(\Delta\omega)$ является линейной. На рис. 5 показан характер зависимости $\Delta E(\Delta\omega)$ для трех условий: $\Delta\Phi = 0$; $\Delta\Phi > 0$; $\Delta\Phi < 0$.

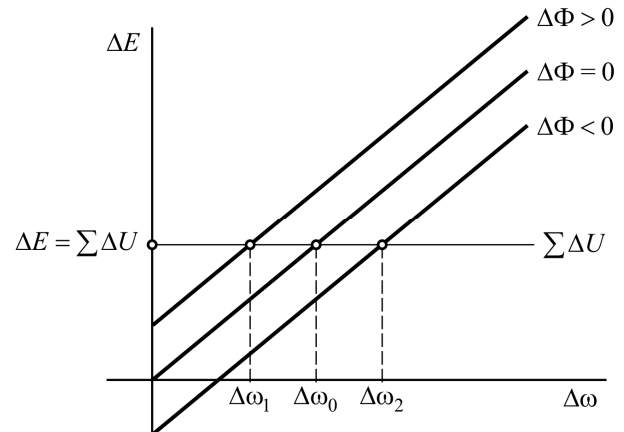


Рис. 5. Характер зависимости $\Delta E(\Delta\omega)$ для $\Delta\Phi \neq 0$

Как видно из графиков на рис. 5, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин ($\Delta\Phi < 0$) для создания заданного значения разности э. д. с. ΔE требуется разность угловых скоростей $\Delta\omega$, большая, чем для случая совпадения магнитных характе-

ристик ($\Delta\Phi = 0$). При положительной разности $\Delta\Phi > 0$ необходимое значение $\Delta\omega$ меньше, чем при $\Delta\Phi = 0$.

Рассмотрим вариант регулирования ΔE путём изменения коэффициента передачи напряжения, при котором:

$$\begin{cases} k_U = var; \\ \Delta\Phi \neq 0; \\ \Delta\omega = 0. \end{cases}$$

В данном варианте условие $\Delta\Phi \neq 0$ принято их тех же соображений, что и в предыдущем, при регулировании $\Delta\omega$.

Выражение (2) для данного условия будет иметь вид

$$\Delta E = c\omega \left(\Phi_{\Gamma} - \frac{1}{k_U} \Phi_{\text{Д}} \right).$$

После преобразований получим это же уравнение в виде

$$\Delta E = c\omega \left[\Phi_{\Gamma} \left(1 - \frac{1}{k_U} \right) + \frac{1}{k_U} \Phi_{\text{Д}} \right].$$

Для случая совпадения магнитных характеристик испытуемых электромашин

$$\Delta E = \left(1 - \frac{1}{k_U} \right) E_{\Gamma}.$$

Качественно характеристики $\Delta E(k_U)$ для условия $E_{\Gamma} = const$ и $\Delta\Phi = 0$ представлены на рис. 6.

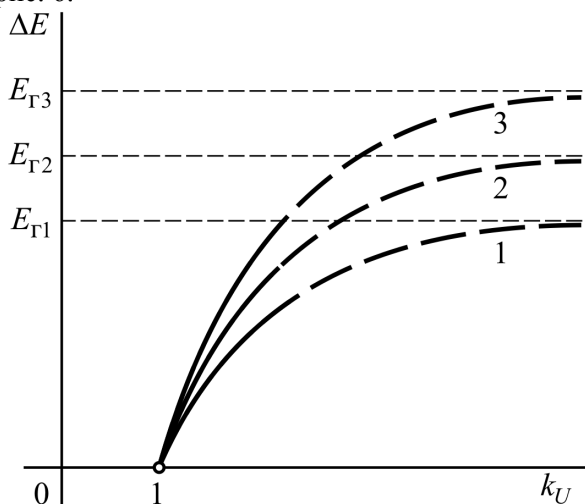


Рис. 6. Характер зависимости $\Delta E(k_U)$ для $\Delta\Phi = 0$

В рассматриваемых вариантах системы взаимного нагружения коэффициент передачи напряжения k_U всегда больше единицы.

На рис. 7 качественно представлен характер зависимости $\Delta E(k_U)$ для случая расхождения магнитных характеристик испытуемых электромашин ($\Delta\Phi \neq 0$).

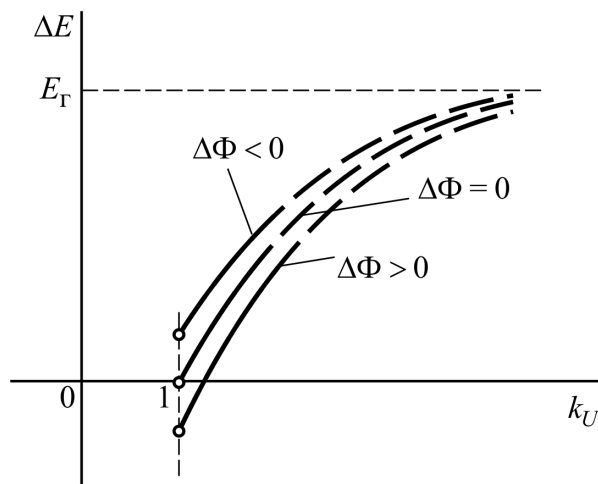


Рис. 7. Характер зависимости $\Delta E(k_U)$ для $\Delta\Phi \neq 0$

Как видно из графиков на рис. 7, при отрицательной разности магнитных потоков испытуемых электромашин ($\Delta\Phi < 0$) для создания заданного значения небалансной э. д. с. ΔE требуется коэффициент передачи напряжения k_U , больший, чем для случая совпадения магнитных характеристик ($\Delta\Phi = 0$). При положительной разности $\Delta\Phi > 0$ необходимое значение k_U меньше, чем при $\Delta\Phi = 0$.

Выводы

Небалансная электродвижущая сила якорей взаимно нагруженных тяговых электромашин обеспечивает небалансную электромагнитную мощность, необходимую для реализации механического способа покрытия электрических потерь в испытуемых электромашинах.

Регулирование небалансной электродвижущей силы взаимно нагруженных тяговых электромашин может осуществляться изменением разницы магнитных потоков, разницы угловых скоростей вращения якорей электромашин и коэффициента передачи напряжения конвертора.

При взаимном нагружении тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками необходим более широкий диапазон регулирования магнитных потоков испытуемых электромашин, чем в случае совпадения магнитных характеристик.

Рациональность каждого из рассмотренных вариантов регулирования режима взаимного нагружения тяговых электромашин будет определяться их типовыми параметрами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Афанасов, А. М. Системы взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока: монография / А. М. Афанасов. – Д.: Изд-во Маковецкий, 2012. – 248 с.
2. Афанасов А. М. Регулирование небалансной электромагнитной мощности в системах взаимного нагружения тяговых электромашин / А. М. Афанасов // Гірничя електромеханіка та автоматика: науково-техн. зб. – 2011. – Вип. 87. – С. 84-87.
3. Бочаров, В. И. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В. И. Бочаров, Г. В. Василенко, А. Л. Курочка, В. П. Янов. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 464 с.
4. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.
5. Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.
6. Захарченко, Д. Д. Тяговые электрические машины: учеб. пособие для вузов / Д. Д. Захарченко, Н. А. Ротанов. – М.: Транспорт, 1991. – 343 с.
7. Лоза, П. О. Покращення енергетичних властивостей стенда для випробувань колекторних тягових двигунів локомотивів / П. О. Лоза // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 22. – С. 69–71.
8. Лоза, П. О. Покращення енергетичних та інших показників приймально-здавальних випробувань тягових двигунів электровозів / П. О. Лоза // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27 – С. 81–83.
9. Правила ремонту электрических машин электровозов і електропоїздів. ЦТ-0204. – К.: Видавничий дім «САМ», 2012. – 286 с.
10. Castaneda, C. E. Discrete-Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor With Controlled Flux / C. E. Castaneda, A. G. Loukianov, E. N. Sanchez // IEEE Transactions. Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59, issue 2. – P. 1194-1206.

Поступила в печать 25.09.2014.

Ключевые слова: тяговая электрическая машина, взаимная нагрузка, электромагнитная мощность, электродвижущая сила, регулирование.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

REFERENCES

1. Afanasov A. M. *Sistemy vzaimnogo nagruzheniya tyagovykh elektricheskikh mashin postoyannogo i pulsiruyushchego toka* [System of mutual loading traction electric machines constant and ripple current]. Dnipropetrovsk. Makovetsky Publ., 2012. 248 p.
2. Afanasov A. M. *Regulirovanie nebalansnoy elektromagnitnoy moshchnosti v sistemakh vzaimnogo nagruzheniya tyagovykh elektromashin* [Regulation unbalanced electromagnetic power systems of electric traction load mutual]. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka* [Mining Electrical Engineering and Automation], 2011, issue 87, pp. 84-87.
3. Bocharov V. I., Vasilenko G. V., Kurochka A. L., Yanov V. P. *Magistralnye elektrovozy. Tyagovye elektricheskije mashiny* [Mainline electric locomotives. Traction electric machines]. Moscow, Energoatom Publ., 1992. – 464 p.
4. gost 2582-81. *Mashiny elektricheskije vrashchayushchiesya tyagovye*. [State Standard 2582-81. Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1981. 34 p.
5. Zherve G. K. *Promyshlennyye ispytaniya elektricheskikh mashin* [Industrial testing of electrical machines]. Leningrad, Energoatom Publ., 1984. 408 p.
6. Zakharchenko D. D. Rotanov D. D. *Tyagovye elektricheskije mashiny* [Traction electric machines]. Moscow, Transport Publ., 1991. 343 p.
7. Loza P. O. *Pokrashchennyya energetichnikh vlastivostey stenda dlya viprobuvan kolektornikh tyagovykh dviguniv lokomotiviv* [Improving energy properties stand for testing collector locomotive traction motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 22, pp. 69–71.
8. Loza P. O. *Pokrashchennyya energetichnikh ta inshikh pokaznikov priymalno-zdavalnikh viprobuvan tyagovykh dviguniv elektrovoziv* [Improving energy and other performance acceptance testing electric locomotives traction motors]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 81–83.
9. *Pravila remontu elektrichnikh mashin elektrovoziv i elektrovoziv* [Rules repair of electric machines of electric locomotives and electric trains]. TsT-0204. – Kyiv, Publishing House «SAM», 2012. 286 p.
10. Castaneda C. E., Loukianov A. G., Sanchez E. N. Discrete-Time Neural Sliding-Mode Block Control for a DC Motor With Controlled Flux. *IEEE Transactions. Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, issue 2, pp. 1194-1206.

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

Рассмотрены вопросы регулирования режимов взаимного нагружения тяговых электрических машин постоянного и пульсирующего тока при проведении их испытаний. Рассмотрены системы взаимной нагрузки электрических машин с механическим способом покрытия электрических потерь. Показано, что в таких системах основным способом управления режимом взаимного нагружения электромашин является регулирование их небалансной электромагнитной мощности путем изменения небалансной э. д. с. якорей. Проведен анализ возможных способов регулирования небалансной э. д. с. взаимно нагруженных электромашин. Получены аналитические и графические зависимости небалансной э. д. с. от таких управляющих параметров как разность магнитных потоков электромашин, разность угловых скоростей и коэффициент передачи напряжения преобразователя электрической мощности. Рассмотрены варианты управления режимом взаимного нагружения тяговых электромашин с расходящимися магнитными характеристиками.

УДК 629.423.31-048.24

А. М. АФАНАСОВ (ДНУЗТ)

Кафедра «Електрорухомий склад залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 373-15-31, ел. пошта: afanasof@ukr.net

РЕГУЛЮВАННЯ НЕБАЛАНСНОЇ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ ВЗАЄМНО НАВАНТАЖЕНИХ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМАШИН ПОСТІЙНОГО ТА ПУЛЬСУЮЧОГО СТРУМУ

Розглянуті питання регулювання режимів взаємного навантаження тягових електричних машин постійного і пульсуючого струму при проведенні їх випробувань. Розглянуті системи взаємного навантаження електричних машин з механічним способом покриття електричних втрат. Показано, що в таких системах основним способом керування режимом взаємного навантаження електромашин є регулювання їх небалансної електромагнітної потужності шляхом змінення небалансної е. р. с. якорів. Проведений аналіз можливих способів регулювання небалансної е. р. с. взаємно навантажених електромашин, отримані аналітичні та графічні залежності небалансної е. р. с. від таких керуючих параметрів як різниця магнітних потоків електромашин, різниця кутових швидкостей та коефіцієнт передачі напруги перетворювача електричної потужності. Розглянуто варіанти керування режимом взаємного навантаження тягових електромашин з розбіжними магнітними характеристиками.

Ключові слова: тягова електрична машина, взаємне навантаження, електромагнітна потужність, електрорушійна сила, регулювання.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

UDC 629.423.31-048.24

A. M. AFANASOV (DNURT)

Department of electrorolling stock of railways. Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician Lazaryana, str. Lazaryana, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 373-15-31, e-mail: afanasof@ukr.net

REGULATION UNBALANCED ELECTROMOTIVE FORCES OF MUTUAL LADEN TRACTION ELEKTROMASHINA DC AND PULSATING CURRENT

The questions of mutual control modes of loading traction electric machines and constant pulsating current during their tests. The systems of mutual loading of electrical machines with mechanical method coating electrical losses. Shown that in such systems the main control method of mutual loading of electrical machines is to regulate their unbalanced electrical magnetic power by changing the unbalanced e. d. f. anchors. The analysis of possible methods of regulation unbalanced e. d. f. one-loaded electrical machines, analytical and graphical dependencies unbalanced e. d. f. on such control parameters as the difference between the magnetic flux electrical machines, and the difference between the angular speeds coefficient of the inverter voltage transfer electrical power. The variants of the control regime of mutual loading traction electric machines with divergent magnetic characteristics.

Keywords: traction electric machine, mutual loading, electric power magnetic, electric driving force, regulation.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

УДК 621.3.048.1

О. Ю. БАЛІЙЧУК (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, ел. пошта: baliichukaleksei@mail.ru

НАГРІВАННЯ І ЗАХИСТ ОБМОТОК ДОПОМІЖНИХ МАШИН ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ЗМІННОГО СТРУМУ ПРИ КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯХ

Вступ

Проведений аналіз статистичних даних показує, що близько 20 % допоміжних двигунів електропоїздів змінного струму, в якості яких застосовано загальнопромислові асинхронні двигуни серії АОМ, АІР виходять з ладу по причині пошкодження обмотки статора. Цей факт говорить про те, що в реальних умовах експлуатації електропоїздів ізоляція обмоток статора перегрівається більше встановлених норм. Тому актуальною є задача детального дослідження процесу нагрівання ізоляції обмоток статора з урахуванням специфічних умов експлуатації. Умови роботи допоміжних двигунів на рухомиому складі залізниць суттєво більш важкі, ніж у промисловості, наприклад: значно більша несиметрія живлячої напруги; зниження напруги в контактній мережі допускається до 19 кВ при номінальному значенні 25 кВ та інше.

Це може привести до короточасних перевантажень і відповідно до збільшення нагрівання ізоляції обмотки статора.

Постановка задачі

Постає задача знайти значення допустимої тривалості перевантаження струмом певної кратності, щоб перевищення температури обмотки статора не було більше допустимого по стандарту [1].

Матеріали і результати досліджень

З метою збільшення точності аналізу процесів нагрівання при пуску досліджувани двигуни пропонується розглядати як неоднорідне тіло, так як теплові параметри обмотки та сталі не однакові [2].

При короточасних перевантаженнях завдяки тепловому опору ізоляції та повільному нагріванню сталі через її значно більшу масу, ніж маса обмотки, нагрівання обмотки відбувається ізольовано від процесу нагрівання сталі. Впливом нагріву обмотки ротора на нагрівання обмотки статора нехтуємо, так як процес короточасний, а теплоємність повітряного зазору

значно послаблює цей вплив. Тому, зважаючи на вище сказане, розглядаємо обмотку статора як окреме однорідне тіло.

Рівняння нагрівання обмотки запишемо у відомій формі [3, 4]

$$\Delta P dt = \alpha F \tau dt + c G d\tau, \quad (1)$$

де ΔP - втрати, що виділяються в обмотці, Вт;

α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/см² · град;

c - питома теплоємність, Вт · с/кг · град;

ΔP , α , c вважаємо такими, що не залежать від температури обмотки і її перевищення τ над температурою навколишнього середовища θ_0 .

При короточасних перевантаженнях можна знехтувати тепловіддачею, якщо час навантаження $t \ll T$, де T - стала часу нагрівання обмотки статора. Припустимо, що двигун до перевантаження працював з навантаженням $P_{\text{поч}}$ при втратах в обмотках $\Delta P_{\text{поч}}$. При сталому режимі перевищення температури обмотки, яке відповідає втратам $\Delta P_{\text{поч}}$, дорівнює $\tau_{\text{поч}}$. Усе тепло, зумовлене втратами в обмотці $\Delta P_{\text{поч}}$, відводиться у навколишнє середовище. У момент часу, коли збільшується навантаження на двигун, струм в обмотці збільшується і в результаті втрати потужності в обмотці зростають до значення ΔP . При цьому додаткове підвищення температури буде визначатися не усіма втратами ΔP , а різницею втрат $\Delta P - \Delta P_{\text{поч}}$. Ця різниця втрат потужності викличе збільшення температури за час t на величину

$$\Delta \tau = \tau - \tau_{\text{поч}} = \frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{поч}})t}{cG}, \quad (2)$$

Звідки перевищення температури обмоток для часу t (від початку перевантаження)

$$\tau = \tau_{\text{поч}} + \frac{(\Delta P - \Delta P_{\text{поч}})t}{cG}. \quad (3)$$

Для номінального навантаження [4]

$$cG = T \frac{\Delta P_{\text{НОМ}}}{\tau_{\text{НОМ}}} \quad (4)$$

$$T = 150 \frac{\tau_{\text{НОМ}}}{j_{\text{S НОМ}}^2}, \quad (11)$$

Підставивши (4) у (3) і приймаючи втрати в обмотках та перевищення температури обмоток пропорційними квадрату струму, отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{ПОЧ}} &= \Delta P_{\text{НОМ}} \frac{I_{\text{ПОЧ}}^2}{I_{\text{НОМ}}^2} = \Delta P_{\text{НОМ}} k_{\text{ПОЧ}}^2 \\ \Delta P &= \Delta P_{\text{НОМ}} \frac{I^2}{I_{\text{НОМ}}^2} = \Delta P_{\text{НОМ}} k^2 \\ \tau_{\text{ПОЧ}} &= \tau_{\text{НОМ}} \frac{I_{\text{ПОЧ}}^2}{I_{\text{НОМ}}^2} = \tau_{\text{НОМ}} k_{\text{ПОЧ}}^2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Так як до перевантаження прийнято сталий тепловий режим, із (3) отримаємо відносне перевищення температури за час t :

$$\frac{\tau}{\tau_{\text{ПОЧ}}} = k_{\text{ПОЧ}}^2 + \frac{t}{T} (k^2 - k_{\text{ПОЧ}}^2) \quad (6)$$

і за час дії перевантаження $t_{\text{пер}}$

$$\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{НОМ}}} = k_{\text{ПОЧ}}^2 + \frac{t_{\text{пер}}}{T} (k^2 - k_{\text{ПОЧ}}^2), \quad (7)$$

А для випадку попередньої роботи з номінальним струмом ($k_{\text{ПОЧ}} = 1$)

$$\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{НОМ}}} = 1 + \frac{t_{\text{пер}}}{T} (k^2 - 1). \quad (8)$$

Або

$$\tau_{\text{пер}} - \tau_{\text{НОМ}} = \Delta \tau_{\text{пер}} = \frac{\tau_{\text{НОМ}} (k^2 - 1) t_{\text{пер}}}{T}. \quad (9)$$

Постійна часу для мідної обмотки дорівнює [4]

$$T = \frac{150}{k_R} \cdot \frac{\tau_{\text{НОМ}}}{j_{\text{S НОМ}}^2}, \quad (10)$$

де k_R - коефіцієнт, який враховує явище витіснення струму в обмотці;

$j_{\text{S НОМ}}$ - номінальна густина струму, $\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$.

Пази обмотки статора допоміжних двигунів електропоїздів змінного струму не є глибокими. Тому явищем витіснення струму можна знехтувати, тобто прийняти $k_R = 1$. Тому,

де

$$j_{\text{S НОМ}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{q}, \quad (12)$$

q - переріз проводу обмотки, мм^2 .

Із (6) допустима тривалість перевантаження $t_{\text{доп}}$ при заданому значенні допустимого перевищення температури $\tau_{\text{доп}}$:

$$t_{\text{доп}} = T \frac{\tau_{\text{доп}} - k_{\text{ПОЧ}}^2 \tau_{\text{НОМ}}}{k^2 - k_{\text{ПОЧ}}^2}. \quad (13)$$

І при $k_{\text{ПОЧ}} = 1$

$$t_{\text{доп}} = T \frac{\tau_{\text{доп}} - \tau_{\text{НОМ}}}{k^2 - 1} = T \frac{\Delta \tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{НОМ}} (k^2 - 1)}, \quad (14)$$

де $\tau_{\text{доп}} - \tau_{\text{НОМ}} = \Delta \tau_{\text{доп}}$ - допустиме додаткове перевищення температури при перевантаженні. Підставивши у рівняння (7) та (13) значення для сталої часу із (11) отримаємо

$$\frac{\tau_{\text{пер}}}{\tau_{\text{НОМ}}} = k_{\text{ПОЧ}}^2 + \frac{j_{\text{S НОМ}}^2}{150 \tau_{\text{НОМ}}} (k^2 - k_{\text{ПОЧ}}^2) t_{\text{пер}}, \quad (15)$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{150 \tau_{\text{НОМ}}}{j_{\text{S НОМ}}^2} \cdot \frac{\tau_{\text{доп}} - k_{\text{ПОЧ}}^2 \tau_{\text{НОМ}}}{k^2 - k_{\text{ПОЧ}}^2}. \quad (16)$$

Якщо двигун до перевантаження працював з номінальним навантаженням, то $k_{\text{ПОЧ}} = 1$ і для цього випадку перевищення температури (при заданих k та $t_{\text{пер}}$)

$$\tau_{\text{пер}} = \tau_{\text{НОМ}} + \frac{j_{\text{S НОМ}}^2 (k^2 - 1) t_{\text{пер}}}{150}, \quad (17)$$

і допустима тривалість перевантаження (при заданому $\tau_{\text{пер}}$)

$$t_{\text{пер}} = \frac{150 (\tau_{\text{пер}} - \tau_{\text{НОМ}})}{j_{\text{S НОМ}}^2 (k^2 - 1)} = \frac{150 \Delta \tau_{\text{пер}}}{j_{\text{S НОМ}}^2 (k^2 - 1)}. \quad (18)$$

Формула (16) дає змогу вирішити поставлену задачу, тобто знайти $t_{\text{доп}} = f(k)$ при заданому $\Delta\tau_{\text{доп}}$ у загальному випадку, а формула (18) дає змогу знайти $t_{\text{доп}} = f(k)$ при заданому $\Delta\tau_{\text{доп}}$, якщо двигун до перевантаження працював з номінальним навантаженням.

Захист допоміжних машин з допомогою теплових реле, що здійснюється у теперішній час має суттєві недоліки. Для розробки більш вдосконаленої системи захисту допоміжних машин електропоїздів важливо з використанням (16) знайти залежність $t_{\text{доп}} = f(k)$ при різних значеннях $\Delta\tau_{\text{доп}}$ під час пуску ($k_{\text{поч}} = 0$). Тоді

$$t_{\text{доп}} = \frac{150\tau_{\text{НОМ}}}{j_{\text{SНОМ}}^2} \cdot \frac{\tau_{\text{доп}}}{\tau_{\text{НОМ}} \cdot k^2} = \frac{150\tau_{\text{доп}}}{j_{\text{SНОМ}}^2 k^2}, \quad (19)$$

де $k = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{НОМ}}}$ - кратність пускового струму.

На електропоїздах серії EP9M після капітального ремонту в якості привода вентиляційних агрегатів пасажирських салонів встановлюються двигуни типу АИР-80В4. Параметри цих двигунів представлено в табл. 1.

Густина струму обмотки статора двигуна типу АИР-80В4, яка виконана із круглого провідника при номінальному ковзанні визначається

$$j_{\text{SНОМ}} = \frac{4I_{\text{НОМ}}}{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2} = \frac{4 \cdot 6,1}{3,14 \cdot (0,71)^2} = 15,44 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

В залежності від умов при прямому пуску асинхронного двигуна кратність струму може набувати значень від $k_{\text{мін}} = 1$ до $k_{\text{макс}} = 7$.

Використовуючи вираз (19) розрахуємо допустиму тривалість перевантаження обмотки статора двигуна типу АИР-80В4 при пуску в діапазоні значень коефіцієнта перевантаження ($k_{\text{мін}} \dots k_{\text{макс}}$). Результати розрахунку приведені в табл. 2.

Залежність $t_{\text{доп}} = f(k)$ для двигуна типу АИР-80В4 наведемо на рис.1.

Таблиця 1

Параметри двигуна АИР-80В4

$P_{\text{НОМ}}$	$U_{\text{НОМ}}$	$I_{\text{НОМ}}$	n	$\eta_{\text{НОМ}}$	$\cos \varphi$	m	$d_{\text{пр}}$	Клас ізоляції
кВт	В	А	об/хв			кг	мм	
1,5	220/380	6,1/3,5	1500	77,0	0,81	13,8	0,71	F

Таблиця 2

Розрахунок залежності $t_{\text{доп}} = f(k)$

k	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
$t_{\text{доп}}, \text{сек}$	69,21	30,76	17,30	11,07	7,69	5,65	4,32	3,41	2,76	2,28	1,92	1,63	1,41

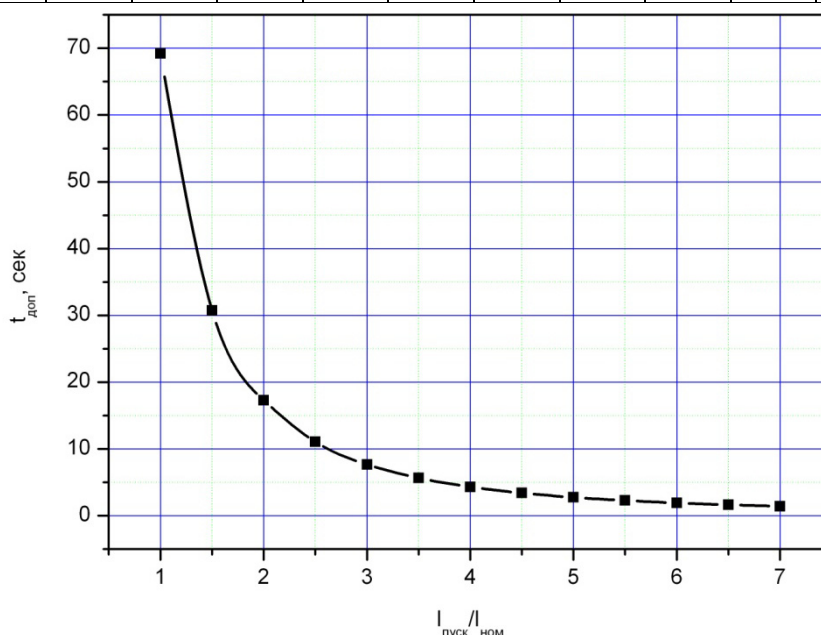


Рис. 1. Залежність $t_{\text{доп}} = f(k)$ для двигуна типу АИР-80В4 під час пуску

На електропоїздах змінного струму серії ЕР9М захист двигунів типу АІР-80В4 здійснюється за допомогою загальнопромислових електротеплових реле типу ТРТ – 115 [6]. Теплове реле використовується для захисту двигуна від перегрівання при роботі в режимі перевантаження. Основними причинами перевантаження асинхронних двигунів на електропоїздах можуть бути збільшення тривалості пуску понад допустимі значення, робота при обриві однієї з фаз живлячої напруги та перевантаження при роботі від мережі із низькою якістю електроенергії.

Головною характеристикою теплового реле як пристрою захисту є залежність часу спрацювання від струму навантаження (часо-струмова характеристика).

Для узгодження характеристик реле і об'єкта, який цим реле захищено, будують їх часо-струмові характеристики. При правильному виборі теплового реле характеристики об'єкта і реле повинні проходити поруч. При цьому буде забезпечено рівність їх постійних часу нагрівання, досягнуто умови, коли $I_{\text{спр}} = 1,2 \dots 1,3 I_{\text{ном}}$. В такому випадку попередньо нагріте номінальним струмом реле надійно спрацює і швидко відімкне захищасей двигун [7].

З метою порівняння часо-струмових характеристик було проведено дослід по визначенню названої характеристики для 5 зразків теплових реле типу ТРТ-115. На рис. 2 наведено реальну часо-струмову характеристику для сімейства теплових реле ТРТ-115.

На представленому рисунку розміщено дві залежності: верхня – отримана експериментально, нижня – характеристика теплового реле за паспортом. Як видно із рис 2., значення похибки часу спрацювання не є сталим і стохастично змінюється при зміні кратності струму нагрівального елемента теплового реле. Значення δ коливається в межах від 20,7% до 74,3%. Середнє значення похибки часу спрацювання досліджуваного теплового реле типу ТРТ-115 становить 48,8%. При цьому таким, що задовольняє умовам налагодження теплового захисту, вважається реле, у якого похибка спрацювання не перебільшує 10% [8, 9].

Як вже було сказано, для надійного спрацювання теплового захисту часо-струмові характеристики реле і двигуна повинні проходити поруч. Побудуємо в одній системі координат отриману раніше залежність $t_{\text{доп}} = f(k)$ для двигуна типу АІР-80В4 та $t = f(k)$ для теплових реле типу ТРТ-115. Як видно з рис. 3, час спрацювання захисту на базі теплового реле ТРТ-115 вищий за допустиму тривалість перевантаження двигуна. Значить, можливим є робота двигуна з перевантаженням впродовж тривалого часу, необхідного для спрацювання теплового реле. При цьому похибка спрацювання теплового реле ТРТ-115 знаходиться в межах від 69% до 89% в залежності від ступеню перевантаження двигуна.

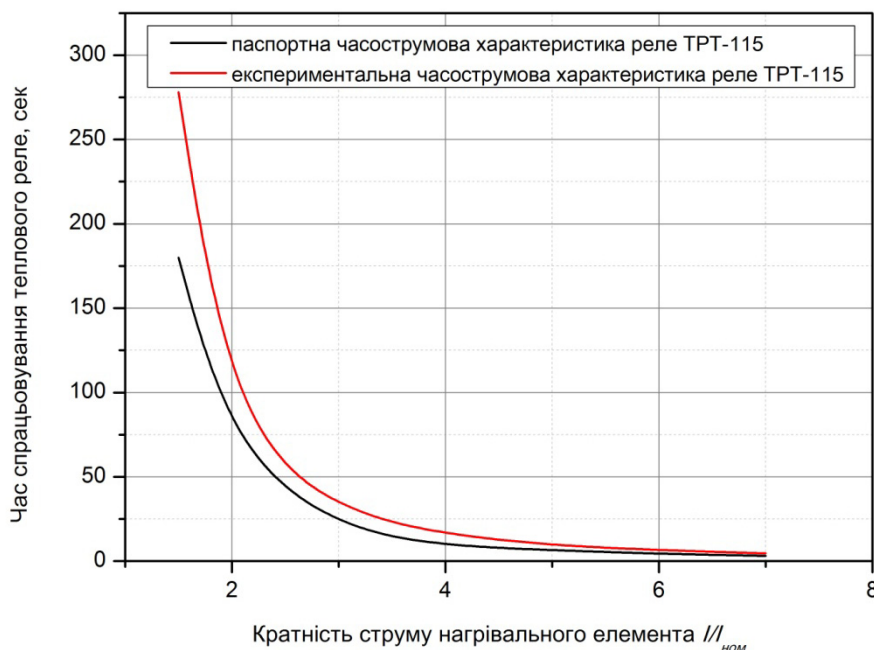


Рис. 2. Часо-струмові характеристики теплових реле типу ТРТ-115

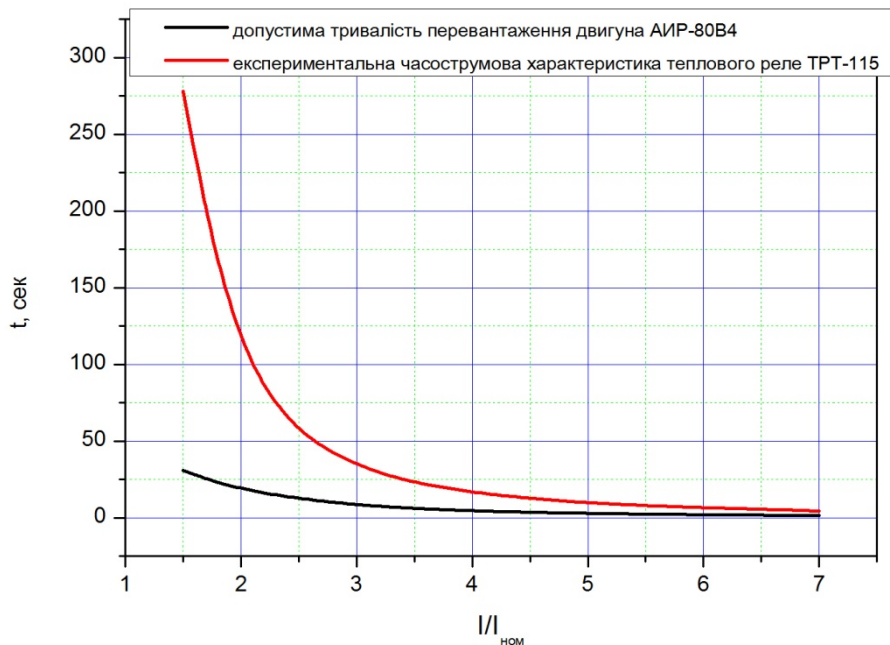


Рис. 3. Порівняння часо-струмових характеристик двигуна АІР-80В4 та теплового реле ТРТ-115

Висновки

В умовах реальної експлуатації на електропоїздах змінного струму серії ЕР9М, двигуни допоміжних машин типу АІР-80В4 в періоди пуску та при невеликих перевантаженнях ($k \geq 3,5$) недостатньо захищені штатним тепловим захистом через те, що час спрацювання теплового реле ТРТ-115 на 74%...89% більше допустимої тривалості перевантаження за умовами нагріву обмотки статора асинхронного двигуна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия: утв. и введен в действие постановлением от 26.05.1981 № 2598 [текст] / Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Стандартиформ, 1998. – 58 с.
- Кацман, М.М. Электрические машины: учебн. для студентов сред. проф. учебных заведений [текст] / М.М. Кацман. – М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. – 463 с.
- Вольдек, А.И. Электрические машины: учебн. для студентов высш. техн. учебн. заведений [текст] / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
- Сыромятников, И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей [текст] / И.А. Сыромятников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
- Обмоточные данные двигателей серии АІР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://principact.ru/content/view/178/112/>.
- Электропоезд ЭР9М. Руководство по эксплуатации [текст]. – М.: Транспорт, 1978. – 328 с.
- Чунихин, А.А. Электрические аппараты (об-

Існуючий тепловий захист практично не здатний надійно відімкнути асинхронний двигун в разі, коли він живиться від мережі із несиметричною напругою, в разі чого можливі такі режими роботи двигуна коли дві його фази майже не завантажені струмом, а одна споживає струм, більший за номінальний. Система теплового захисту не спрацює і може бути пошкоджено ізоляцію найбільш завантаженої струмом фази обмотки.

REFERENCES

- GOST 2582-81. *Mashinyi elektricheskie vraschayuschiesya tyagovye. Obschie tehnicheckie usloviya* [State Standard 2582-81. Rotate electrical machines for rail and road vehicles. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 1998. 58 p.
- Katsman M.M. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, Academia Publ., 2001. 463 p.
- Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1978. 832 p.
- Syromyatnikov I.A. *Rezhimy raboty asinhronnyih i sinhronnyih elektrodvigateley* [Modes of operation of asynchronous and synchronous motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 240 p.
- Obmotochnyie dannyye dvigateley serii AIR* (Winding data of engines series AIR) Available at: <http://principact.ru/content/view/178/112/>
- Elektropoezd ER9M. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Electric train ER9M. Manual]. Moscow, Transport Publ., 1978. 328 p.
- Chunihin A.A. *Elektricheskie apparaty* [Electric apparatuses]. Moscow, Energiya Publ., 1975. 648 p.
- Zimenkov M.G., Rozenberg G.V., Feskov E.M. *Spravochnik po naladke elektrooborudovaniya promy-*

щий курс) [текст] / А.А. Чунихин. – М.: Энергия, 1975. – 648 с.

8. Зименков, М.Г. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий [текст] / М.Г. Зименков, Г.В. Розенберг, Е.М. Феськов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 480 с.

9. Вплив умов експлуатації на надійність двигунів компресорів електропоїздів постійного струму [текст] / Л.В. Дубинець, Д.В. Устименко, Є.О. Жернаков, Р.В. Краснов // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2007. – Вип. 18. – С. 29-31.

ishlennyih predpriyatiy [Handbook of adjustment of electrical equipment of industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 480 p.

9. Dubinets L.V., Ustimenko D.V., Zhernakov E.O., Krasnov R.V. *Vplyv umov ekspluatatsii na nadiynist dviguniv kompresoriv elektropoizdiv postiyного strumu* [Influence of operating conditions on the reliability of electric compressor motors DC]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 18, pp. 29-31.

Надійшла до друку 05.11.2014.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

Статистичний аналіз показує, що близько 20% допоміжних машин електропоїздів змінного струму (компресор, масляний насос охолодження тягового трансформатора, двигуни вентиляційних агрегатів) виходять з ладу щорічно. Очевидно, що питання підвищення надійності допоміжних машин на електропоїздах змінного струму серії ЕР9М наразі є актуальним. Основною причиною виходу з ладу цих машин є пошкодження ізоляції обмотки статора електричного двигуна. На електропоїздах серії ЕР9М застосовують загальнопромислові асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором типу АОМ та подібні до них, більш сучасні типу АІР. Факт виходу з ладу двигуна говорить про те, що ізоляція обмотки статора перегрівається вище допустимих температур. Причиною цьому стає той факт, що двигун в режимі реальної експлуатації працює із короткочасними перевантаженнями. Ці перевантаження обумовлено тим, що двигуни працюють в суттєво більш важких умовах, ніж в промисловості, до чого можна віднести значні відхилення живлячої напруги, які властиві рухомому складу електрифікованому на змінному струмі, роботу агрегатів при низьких температурах атмосферного повітря та інше. В роботі поставлено задачу визначити гранично допустиму тривалість короткочасних перевантажень, при яких ізоляція двигуна не буде перегріта вище допустимих температур. Запропоновано інженерний метод визначення названої характеристики. Експериментально знято часоструміву характеристику електротеплового реле. Виконано порівняння отриманої аналітичної залежності із експериментально отриманими характеристиками реального теплового захисту на базі теплового реле ТРТ-115. Розроблено рекомендації по підвищенню надійності теплового захисту асинхронних короткозамкнених двигунів, які працюють в режимах короткочасних перевантажень.

Ключові слова: допоміжні машини, електропоїзд змінного струму, ізоляція, перегрів, короткочасне перевантаження, теплове реле.

УДК 621.3.048.1

А. Ю. БАЛИЙЧУК (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, 49010, г. Днепропетровск, Украина, г. Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, эл. почта: baliichukaleksei@mail.ru

НАГРЕВАНИЕ И ЗАЩИТА ОБМОТОК ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ МАШИН ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ КРАТКОВРЕМЕННЫХ ПЕРЕГРУЗКАХ

Статистический анализ показывает, что около 20% вспомогательных машин электропоездов переменного тока (компрессор, масляный насос охлаждения тягового трансформатора, двигатели вентиляционных агрегатов) выходят из строя ежегодно. Очевидно, что вопрос повышения надежности вспомогательных машин на электропоездах переменного тока серии ЭР9М сейчас является актуальным. Основной причиной выхода из строя этих машин является повреждение изоляции обмотки статора электродвигателя. На электропоездах серии ЭР9М применяют общепромышленные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором типа АОМ и подобные им, более современные типа АІР. Факт выхода из строя двигателя говорит о том, что изоляция обмотки статора перегревается выше допустимых температур. Причиной этому становится тот факт, что двигатель в режиме реальной эксплуатации работает с кратковременными перегрузками. Эти перегрузки обусловлены тем, что двигатели работают в существенно более трудных условиях, чем в промышленности, к чему можно отнести значительные отклонения питающего напряжения, которые свойственны подвижному составу электрифицированному на переменном токе, работу агрегатів при низких температурах атмосферного воздуха и прочее. В работе поставлена задача определить предельно допустимую продолжительность кратковременных перегрузок, при которых изоляция двигателя не будет перегрета выше допустимых температур. Предложен инженерный метод определения названной характери-

© Балійчук О. Ю., 2014

сти. Экспериментально снята времятоковая характеристика электротеплового реле. Выполнено сравнение полученной аналитической зависимости с экспериментально полученными характеристиками реального тепловой защиты на базе теплового реле ТРТ-115. Разработаны рекомендации по повышению надежности тепловой защиты асинхронных короткозамкнутых двигателей, работающих в режимах кратковременных перегрузок.

Ключевые слова: вспомогательные машины, электропоезд переменного тока, изоляция, перегрев, кратковременная перегрузка, тепловое реле.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 621.3.048.1

O. U. BALIICHUK (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 373-15-47, e-mail: baliichukaleksei@mail.ru

HEATING AND PROTECTION THE WINDINGS OF AUXILIARY MACHINES OF THE AC ELECTRIC MULTIPLE-UNIT TRAINS AT SHORT-TIME OVERLOADS

Statistical analysis shows that about 20% of the auxiliary machines of AC electric multiple-unit trains (compressor, oil pump for cooling traction transformer, the motors of ventilation aggregates) are fails every year. Obviously, that the issue of increasing the reliability of auxiliary machines of AC trains ER9M series is now urgent. The main cause of the failure of these machines is the insulation damage of the stator winding of the motor. On the trains ER9M series use the general purpose industrial induction motors with squirrel-cage rotor of AOM type and the similar to them, more modern AIR type. The fact of the failure of the engine shows that the insulation of the stator winding overheating above the allowable temperature. The reason of that becomes the fact that the engine in a mode of real operation works with transient overloads. These overloads caused by the fact that the engines are work in a much more difficult conditions than in industry, to which can be attributed the significant variations of the supply voltage, which are characteristic of the AC rolling stock, operation at low air temperatures and so on. In this paper it is set the task to identify the maximum permissible duration of transient overloads, during which the motor insulation will not be overheated above the allowable temperature. An engineering method for determining these characteristics is proposed. Experimentally obtained the time-current characteristics of the electrothermal relays. The comparison of the obtained analytical dependence with the experimentally measured characteristics of real thermal protection on the basis of the thermal relay TRT-115 is done. Formulated recommendations to increase the reliability of the thermal protection of asynchronous motors with squirrel-cage rotor, which are work in transient overloads modes.

Keywords: auxiliary machine, AC electric multiple-unit train, insulation, overheat, short-term overload, thermal relays.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

УДК 629.423.31:621.313.333

Ю. С. БОНДАРЕНКО (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, ел. пошта: bondar198924@gmail.com

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ МОДУЛЯЦІЇ ТЯГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОВОЗІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З АСИНХРОННИМ ПРИВОДОМ НА СУМІЖНІ СИСТЕМИ

Вступ

З початком впровадження в експлуатацію електрорухомого складу з асинхронним тяговим електроприводом (ЕРС з АТЕП) особливо гостро постало питання його електромагнітної сумісності (ЕМС) з суміжними системами електрифікованих залізниць. Особливістю електроприводу такого ЕРС є застосування у його структурі статичного перетворювача частоти який при роботі здійснює негативний електромагнітний вплив на роботу суміжного електротехнічного обладнання. Інтенсивність такого впливу, здебільшого, визначається частотою модуляції вихідної напруги, що живить тяговий асинхронний двигун [1].

Особливістю даних експериментальних досліджень є оцінка ЕМС ЕРС з АТЕП з суміжними системами залізниць постійного струму, яка є недостатньо розкритою через відсутність достатнього досвіду експлуатації ЕРС розглянутого типу.

Постановка задачі

Оскільки повністю виключити вплив ЕРС з АТЕП на вказані суміжні системи неможливо постає задача розглянути можливість його зниження шляхом вибору відповідної частоти модуляції тягового перетворювача, що і визначає напрямок досліджень, проведених у роботі.

Матеріали і результати досліджень

Серед загального переліку електричних систем електрифікованих залізниць, сукупна робота яких забезпечує їх функціонування, головну увагу завжди привертала кола СЦБ та тягового електропостачання. Робота таких кіл безперервно супроводжується наявністю електромагнітної взаємодії з суміжними системами, що може бути причиною їх ненормального функціонування [2]. Однією з ключових систем, електромагнітна взаємодія з якою може бути причиною порушення працездатності систем СЦБ є тягова мережа, вплив якої визначається якістю напру-

ги живлячих енергосистем, яка в свою чергу залежить від характеристик під'єданого до мережі навантаження [3, 4].

Загалом, вплив тягового навантаження на якість електроенергії живлячих енергосистем оцінюється показниками несиметрії та несинусоїдальності струмів та напруг. Несиметрія струмів в енергосистемі, як правило не потребує прийняття спеціальних засобів щодо її симетрування, оскільки в потужних системах тягове навантаження становить не більше 10-15% їх загального навантаження [5].

Ступінь несинусоїдальності струмів та напруг живлячих енергосистем визначається сукупністю у їх складі вищих гармонійних складових. Їх вплив на систему зовнішнього електропостачання є досить не значним і його, як правило, слід враховувати лише при визначенні заважаючого впливу тягової мережі на суміжні системи електрифікованих залізниць.

Специфіка досліджень ЕМС ЕРС з АТЕП передбачає головним чином оцінку його електромагнітного впливу на системи СЦБ, як основні системи, вплив перешкод тягового струму на які може бути причиною порушення нормального функціонування залізниць. Між тим останнє твердження, щодо несинусоїдальності струмів та напруг, надає можливість оцінити його вплив і на мережу зовнішнього електропостачання, проте лише в першому наближенні.

Основою виконання експериментальних досліджень є експериментальна установка, що імітує функціонування АТЕП ЕРС постійного струму, розроблена із застосуванням основних принципів неповного фізичного моделювання та основ теорії подібності [6].

Технічні можливості створеної експериментальної установки дозволяють здійснювати зміну частоти модуляції вихідної напруги перетворювача в досить широких межах – 0,5...16 кГц з кроком в 0,1 кГц. При цьому, аналіз робочих параметрів тягових статичних перетворювачів сучасного ЕРС з АТЕП, як пос-

тійного так і змінного струму, дозволив встановити, що, не зважаючи на технічні можливості сучасних силових вентилів [7, 8], максимальна робоча частота модуляції останніх не перевищує значення 2 кГц та знаходиться в межах 0,45...2 кГц [9, 10]. Ці значення дозволяють внести відповідні обмеження у процес експериментального дослідження.

На рис.1 наведено вибіркові результати гармонійного аналізу осцилограми вхідного струму експериментальної установки з урахуванням приведення амплітуд вищих гармонійних складових до реальних значень через відповідні масштабні відношення:

$$I_{1OP} = \frac{U_{1B} \cdot I_{1B}(P_{2B})}{U_{1M} \cdot I_{1M}(P_{2M})} \cdot \frac{U_{1МОД} \cdot I_{1МОД}}{U_{1OP}} \quad (1)$$

У виразі (1):

U_{1B} , U_{1M} – напруги живлення асинхронних двигунів обох систем;

$I_{1B}(P_{2B})$, $I_{1M}(P_{2M})$ – аналітичні вирази апроксимації характеристик двигунів в загальному вигляді;

$U_{1МОД}$, U_{1OP} – первинні напруги живлення обох систем, відповідно 200 В та 3300 В;

$I_{1МОД}$ – вхідний струм експериментальної установки за результатами експерименту.

Вираз (1) є результатом встановлення подібності експериментальної установки до реальної системи з урахуванням вдосконаленої методик визначення масштабних відношень для нелінійних систем, що мають у своєму складі однакові складові, але різні граничні параметри [11].

На рис. 1:

а) – смуга частот пропускання сигнального струму 25 Гц;

б) – смуга частот пропускання сигнального струму 50 Гц;

в) – смуга частот пропускання сигнального струму 175 Гц;

г) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-3;

д) – смуга частот пропускання сигнального струму діапазону ТРЦ-4.

В даному випадку результати стосуються частоти модуляції 0,5 кГц, дослідження якої проведено у якості прикладу. Як видно з отриманих результатів найбільшого кондуктивного впливу зазнають РК, що працюють на частотах тонального діапазону ТРЦ-3 (420-780 Гц) смуга пропускання частот сигнального струму яких є найбільш насиченою вищими гармонійними складовими (рис. 1, г). В даному випадку такий характер

впливу є сукупним та пояснюється не лише наявністю у складі досліджуваної системи перетворювача частоти а й особливостями випрямлення напруги трифазним мостовим випрямлячем, що генерує гармонійні складові кратні 300 Гц.

Окрім частот тонального діапазону, значного кондуктивного впливу, за частоти модуляції 0,5 кГц, зазнають РК з частотою сигнального струму 50 Гц значення відповідної амплітуди струму перешкоди для яких перевищує нормоване майже вдвічі.

Аналогічно до розглянутого вище здійснено аналіз решти осцилограм для частот модуляції 0,6...2 кГц, що розглядаються за умовами дослідження.

Результатом проведеного аналізу є отримані залежності зміни амплітуд струмів перешкод (рис. 2), що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ та дозволяють здійснювати налаштування частот модуляції тягового статичного перетворювача в залежності від робочої частоти сигнального струму РК. В загальному випадку під поліпшенням в роботі прийнято не перевищення контрольованими показниками своїх нормованих значень або їх середня відсоткова зміна відносно нормованих значень.

Значення амплітуд струмів перешкод, на отриманих залежностях, наведено у відсотках по відношенню до нормованих значень, що регламентуються [12].

Користуючись отриманими залежностями (рис. 2), з точки зору поліпшення показників ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму, можна вказати, що серед досліджуваного діапазону частот модуляції не виявлено жодної, яка б задовольняла умовам безперешкодної роботи РК всіх діапазонів частот сигнального струму. Так, для РК частотного діапазону 25 Гц найбільш рекомендованими до застосування є частоти модуляції 0,5 кГц та 1,4 кГц, за яких спостерігається зниження амплітуд струмів перешкод до рівня 10-12% від нормованих значень.

Для РК з частотою сигнального струму 175 Гц єдиною частотою модуляції, за якої може спостерігатись безперешкодна робота систем СЦБ, є 0,9 кГц. За даної частоти визначено поліпшення показників ЕМС тягового перетворювача ЕРС з АТЕП постійного струму на рівні 25% відносно контрольованих нормованих значень.

Безперешкодна робота РК тонального діапазону з частотами сигнального струму 480 Гц та 720 Гц може спостерігатись за умови застосування частот модуляції 0,7 кГц, 1,5 кГц, 1,6 кГц та 0,7 кГц, 0,9 кГц, 1,6 кГц, 1,9 кГц, 2 кГц відповідно.

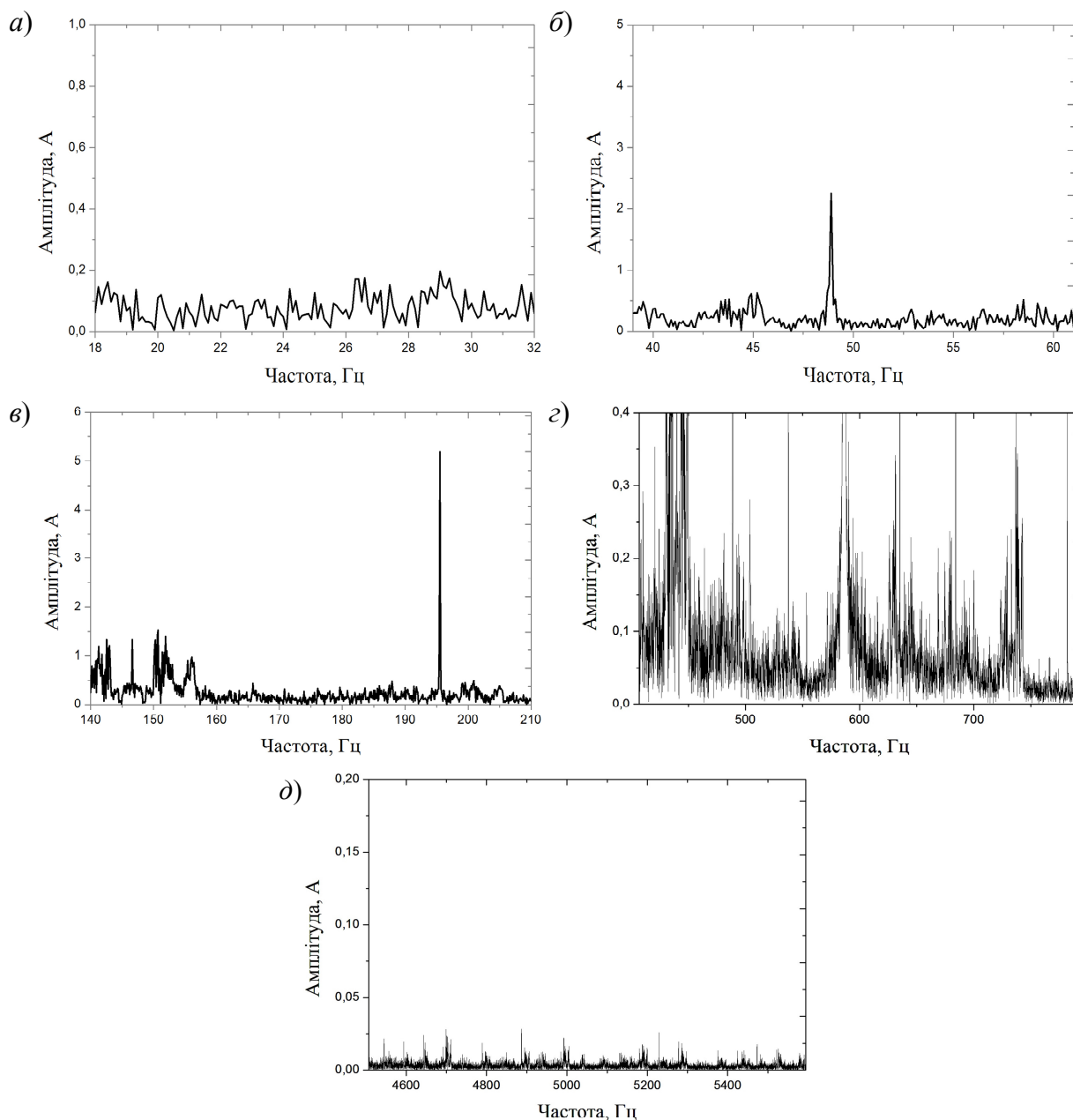


Рис. 1. Вибіркові результати гармонійного аналізу осцилограми вхідного струму експериментальної установки

Такий висновок підтверджується зафіксованим можливим зниженням амплітуд струмів перешкод до рівня 50-60% (480 Гц) та 20-40% (720 Гц) відносно нормованих значень.

Для РК з робочими частотами 50 Гц, 420 Гц, 580 Гц та 780 Гц серед розглянутого діапазону частот модуляції не виявлено жодної частоти, яка б повноцінно задовольняла умови безперешкодної роботи систем СЦБ з точки зору їх ЕМС з ЕРС з АТЕП. Не зважаючи на це існує ряд частот за яких перевищення нормованих значень контрольованих показників ЕМС є найнижчим і які наближено можливо рекомендувати в якості робочих за умови експлуатації розглянутого

ЕРС з вказаними РК. Дані частоти та характерні для них показники ЕМС наведено нижче:

РК 50 Гц – частота модуляції 1,1 кГц (перевищення нормованих значень на рівні 15%);

РК 420 Гц – частота модуляції 1,4 кГц (перевищення нормованих значень на рівні 3%);

РК 580 Гц – частота модуляції 1,9 кГц (перевищення нормованих значень на рівні 67%);

РК 780 Гц – частота модуляції 1,2 кГц (перевищення нормованих значень на рівні 27%);

Аналогічні до рис. 2 залежності побудовано і для обраних контрольованих показників $K_{U(n)}$ та K_U [13], що характеризують якість напруги живлячих енергосистем. Дані залежності наведено на рис. 3 та 4 відповідно.

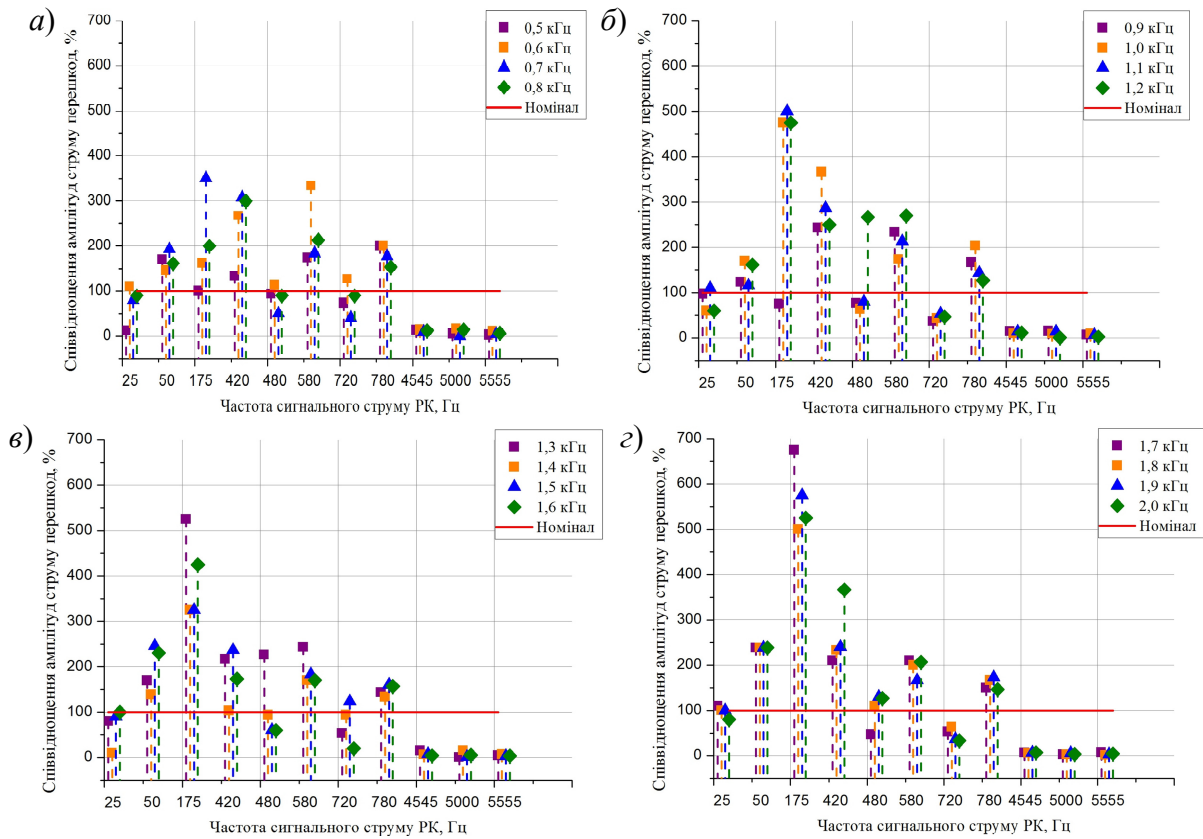


Рис. 2. Залежності зміни струмів перешкод, що характеризують ступінь поліпшення показників ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами СЦБ

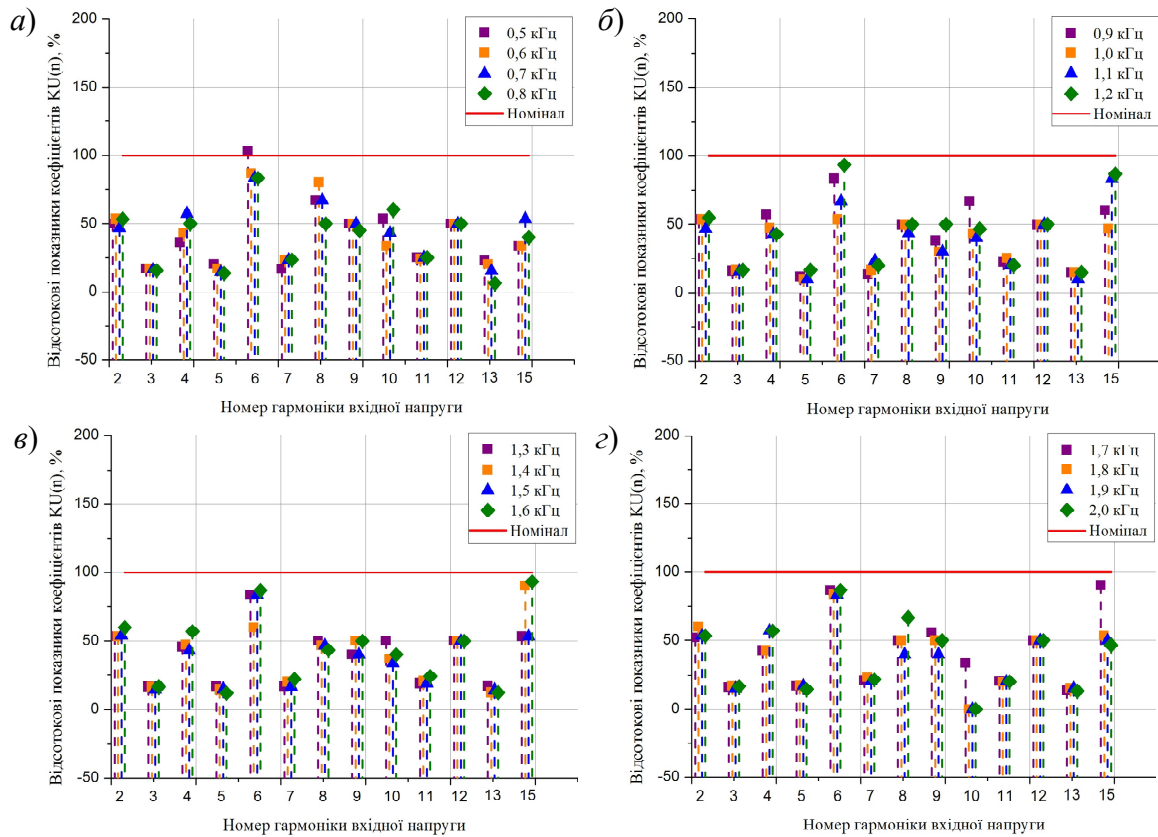


Рис. 3. Залежності зміни показників $K_{U(n)}$, що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання

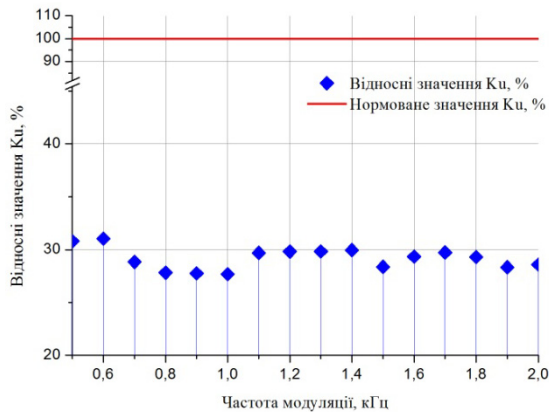


Рис. 4. Залежності зміни показника K_U , що характеризують ступінь поліпшення ЕМС ЕРС з АТЕП постійного струму з системами зовнішнього електропостачання

На підставі отриманих залежностей (рис. 3, 4), з точки зору взаємодії з мережею зовнішнього електропостачання, найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції можуть бути частоти 0,8 кГц, 0,9 кГц, 1 кГц, 1,1 кГц, 1,5 кГц, 1,8 кГц та 1,9 кГц застосування яких дозволяє досягти відносного поліпшення показника K_U до рівня 27 % від нормованого значення та середнього відсоткового значення показника $K_{U(n)}$ до рівня 35-37 % від нормованих значень.

Висновки

Отримані результати досліджень дозволяють зробити відповідні висновки, щодо впливу перетворювача частоти на показники функціонування розглянутих систем та можливості їх поліпшення шляхом зміни частоти модуляції:

- з точки зору систем СЦБ найбільш вразливими до дії перешкод є РК, що працюють на частотах 25 Гц, 50 Гц, 175 Гц та частотах тонального діапазону ТРЦ-3 – 420-780 Гц. За умови сукупної взаємодії АТЕП ЕРС постійного струму

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Литовченко В. В. Определение энергетических показателей электроподвижного состава переменного тока с 4q-S-преобразователями // *Электротехника*. – 1993. – №5. – С.23–31.
2. Поплаухин Э. Н. Пособие по ознакомлению с основными принципами работы и системами электроснабжения устройств СЦБ [Электронный ресурс] / Э. Н. Поплаухин, Н. В. Ожиганов. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2001. – Режим доступа: <http://групп.пф/index.php?PHPSESSID=hf16jk6ej4r8qlirbmiqkdt5r1&action=profile;u=1;area=showposts>.
3. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
4. Сиченко В.Г. Развитие научных основ повышения электромагнитной сумисности подсистем

му з вказаними РК найбільш рекомендованими частотами модуляції тягового перетворювача частоти є: 0,5 кГц та 1,4 кГц – для РК 25 Гц; 0,9 кГц – для РК 175 Гц; 0,7 кГц, 1,5 кГц, 1,6 кГц та 0,7 кГц, 0,9 кГц, 1,6 кГц, 1,9 кГц, 2 кГц – для ТРЦ-3 з частотами 480 Гц та 720 Гц. Застосування вказаних частот модуляції дозволяє досягти відносного зниження амплітуд струмів перешкод на вказаних діапазонах, а отже поліпшення ЕМС розглянутого ЕРС з системами СЦБ, до рівнів: 10-12 % від нормованих значень – для РК 25 Гц; 75 % від нормованих значень – для РК 175 Гц; 50-60 % та 20-40 % від нормованих значень для ТРЦ-3 з частотами 480 Гц та 720 Гц відповідно. Для РК з іншими частотами сигнального струму частот модуляції які б повноцінно задовольняли умовам безперешкодної роботи систем СЦБ з точки зору їх ЕМС з ЕРС з АТЕП постійного струму встановлено не було.

- з точки зору системи тягового електропостачання за жодної з частот модуляції, серед розглянутого діапазону, не було встановлено критичного перевищення контрольованих показників ЕМС (коефіцієнтів K_U та $K_{U(n)}$) при номінальному режимі роботи АТЕП ЕРС постійного струму. Це загалом підтверджує результати отримані у роботі [4]. Не зважаючи на це найбільш рекомендованими до застосування частотами модуляції, за вказаного режиму роботи АТЕП, можуть бути частоти 0,8 кГц, 0,9 кГц, 1 кГц, 1,1 кГц, 1,5 кГц, 1,8 кГц та 1,9 кГц застосування яких дозволяє досягти відносного поліпшення показника K_U до рівня 27 % від нормованого значення та середнього відсоткового значення показника $K_{U(n)}$ до рівня 35-37 % від нормованих значень.

REFERENCES

1. Lytovchenko V. V. *Opredelenye enerheticheskikh pokazateley elektropodvyzhnogo sostava peremennogo toka s 4q-S-preobrazovatelayamy* [Energy datum determining of AC electric rolling stock with 4q-S converters], 1993, issue 5, pp.23-31.
2. Poplauhlin E. N. *Posobie po oznakomleniyu s osnovnyimi printsipami raboty i sistemami elektrosnabzheniya ustroystv STsB* [Manual for familiarization with basic work principles and power supply systems of SCB devices] Available at: <http://групп.пф/index.php?PHPSESSID=hf16jk6ej4r8qlirbmiqkdt5r1&action=profile;u=1;area=showposts>.
3. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovmestimost* [Electromagnetic compatibility]. Moscow, UMK MPS Publ., 2002, 628 p.
4. Sichenko V.G. *Rozvitok naukovih osnov pidvischennya elektromagnitnoyi sumisnosti pidsistem elektrich-*

електричної тяги постійного струму залізничного транспорту: Дисертація доктора технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 396 с.

5. Справочник по электроснабжению железных дорог. Т.1 / под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980 – 256 с.

6. Бондаренко Ю. С. Экспериментальна установка для дослідження електромагнітної сумісності тягових статичних перетворювачів електрорухомого складу з системами електрифікованих залізниць / Ю.С. Бондаренко // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 31. – С.101–108 с.

7. Муха А.М. Развитие научных основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів: Дисертація доктора технічних наук. – Д.: ДНУЗТ, 2011. – 362 с.

8. Некоторые тенденции в развитии приборов и устройств силовой электроники / Г.В. Грабовецкий, С.А. Харитонов, Е.Б. Преображенский и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2001. – №9. – С.921–928.

9. Соколов Ю. Н. Электровоз ДС3. Устройство, управление, обслуживание: конспект [для лок. бригад] / Соколов Ю. Н. – К.: КУЕТТ, 2011. – 299 с.

10. Тяговый преобразователь SIBAC E23-3000-1DC-2ST-1STm-oR. Инструкция по эксплуатации. – Siemens AG, 2010. – 106 с.

11. Бондаренко Ю.С. Передумови експериментального дослідження електромагнітної сумісності тягового асинхронного електроприводу в структурі системи тягового електропостачання постійного струму / Ю.С. Бондаренко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2014. - №3(51). - С.42-50.

12. ЖТ ЦТ 04-98 Электровозы. Нормы безопасности. – М.,1998. – 88 с.

13. Бондаренко Ю.С. Вибір критеріїв для оцінки електромагнітної сумісності тягових перетворювачів перспективних електровозів / Ю.С. Бондаренко // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В.Лазаряна. – 2012. - №42. - С.85-89.

Надійшла до друку 16.10.2014.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, електрорухомий склад, асинхронний привод, частота модуляції.

noyi tyagi postynogo strumu zaliznichnogo transportu [Development of scientific fundamentals of improving the electromagnetic subsystems compatibility of DC electric traction railways]. Thesis for getting scientific degree of engineering sciences doctor on the speciality 05.22.09 - electric transport. V. Lazaryan's Dnipropetrovsk national university of railway transport, Dnipropetrovsk, 2011.

5. Markvardt K.G. *Spravochnik po elektrosnabzheniyu zheleznyih dorog* [Handbook for electric supply of electrified railways] Moscow, Transport Publ., 1980, 256 p.

6. Bondarenko Yu. S. *Eksperimentalna ustanovka dlya doslIdzhennya elektromagnitnoyi sumisnosti tyagovih statichnih peretvoryuvachiv elektroruhomogo skladu z sistemaми elektrifikovanih zaliznits* [Experimental set for research electromagnetic compatibility of static traction converters of electric rolling stock with the systems of electrified railways] *Zbirnik naukovih prats Donetskogo Institutu zaliznichnogo transportu* [Miscellany of scientific works of Donetsk institute of railway transport] 2012, issue 31, pp.101-108.

7. Muha A.M. *Rozvitok naukovih osnov stvorenniya tyagovih elektroperedach bagatosistemnih ektrovovziv* [Development of scientific basis for designing of traction electric power transmissions for multisystem electric locomotives] Thesis for getting scientific degree of engineering sciences doctor on the speciality 05.22.09 - electric transport. V. Lazaryan's Dnipropetrovsk national university of railway transport, Dnipropetrovsk, 2011.

8. Grabovetskiy G.V., Haritonov S.A., Preobrazhenskiy E.B. *Nekotoryie tendentsii v razvitii priborov i ustroystv silovoy elektroniki* [Some tends in development of instruments and devices of power electronic] *Himiya v interesah ustoychivogo razvitiya* [Chemistry in the interests of steady development] 2001, issue 9, pp.921-928.

9. Sokolov Yu. N. *Elektrovov DS3. Ustroystvo, upravlenie, obsluzhivanie* [DS3 the electric locomotive. Construction, control, service] Kiev, KUETT Publ., 2011. 299 p.

10. *Tyagovyyiy preobrazovatel SIBAC E23-3000-1DC-2ST-1STm-oR. Instruksiya po ekspluatatsii*. [SIBAC E23-3000-1DC-2ST-1STm-oR the traction converter. Manual] Siemens AG Publ., 2010. 106 p.

11. Bondarenko Yu.S. *Peredumovi eksperimentalnogo doslIdzhennya elektromagnitnoyi sumisnosti tyagovogo asinhronnogo elektroprivodu v strukturi sistemi tyagovogo elektropostachannya postynogo strumu* [Background of experimental investigation of electromagnetic compatibility tractive asynchronous electric drives in the system structure of traction power DC] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2014, issue 3(51), pp. 42-50.

12. *ZhT TsT 04-98 Elektrovozyi. Normyi bezopasnosti*. [Electric locomotives. Standarts of safety] Moscow, 1998. 88 p.

13. Bondarenko Yu.S. *Vibir kriteriyiv dlya otsinki elektromagnitnoyi sumisnosti tyagovih peretvoryuvachiv perspektivnih elektrovoziv* [Choice a criteria for estimating the electromagnetic compatibility of tractive converters of perspective electric locomotive] *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2012, issue 42, pp. 85-89.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Андрієнко П. Д.*

Станом на 01.01.2011 р. серед загальної експлуатаційної довжини електрифікованих залізниць України (9877 км) близько половини (4764 км) залишається електрифіковано постійним струмом. При цьому заміна цих ділянок ділянками змінного струму потребує значних капіталовкладень. З урахуванням цього в рамках підвищення ефективності роботи залізниць постійного струму існує тенденція, щодо впровадження в експлуатацію електрорухомого складу з асинхронним тяговим приводом, особливістю якого є статичний перетворювач частоти. Поява у структурі енергоперетворення мережі тягового електропостачання постійного струму принципово нової тягової одиниці викликає підвищений інтерес, щодо її взаємодії з суміжними системами залізниць, а також щодо пошуку можливих шляхів її поліпшення.

В роботі розглянуто можливість поліпшення електромагнітної сумісності (ЕМС) таких тягових одиниць з системами СЦБ та мережею зовнішнього електропостачання за рахунок вибору відповідних частот модуляції тягового перетворювача. В результаті отримано такі діапазони частот модуляції, за яких спостерігається максимальне відносне поліпшення характерних для даних систем показників ЕМС і які можуть бути рекомендованими для подальшого застосування за умови подальшого впровадження в експлуатацію електро-возів розглянутого типу.

УДК 629.423.31:621.313.333

Ю. С. БОНДАРЕНКО (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, 49010, г. Днепропетровск, Украина, г. Днепропетровск, ул. Лазаряна, 2, тел.: (056) 373-15-47, эл. почта: bondar198924@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ МОДУЛЯЦИИ ТЯГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА С АСИНХРОННЫМ ПРИВОДОМ НА СМЕЖНЫЕ СИСТЕМЫ

По состоянию на 01.01.2011 г. среди общей эксплуатационной длины электрифицированных железных дорог Украины (9877 км) около половины (4764 км) остается электрифицировано постоянным током. При этом замена этих участков участками переменного тока требует значительных капиталовложений. С учетом этого в рамках повышения эффективности работы железных дорог постоянного тока существует тенденция по внедрению в эксплуатацию электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом, особенностью которого является статический преобразователь частоты. Появление, в структуре энергопреобразования сети тягового электроснабжения постоянного тока, принципиально новой тяговой единицы вызывает повышенный интерес с точки зрения её взаимодействия со смежными системами железных дорог, а также с точки зрения поиска возможных путей его улучшения.

В работе рассмотрена возможность улучшения электромагнитной совместимости (ЭМС) таких тяговых единиц с системами СЦБ и сетью внешнего электроснабжения за счет выбора соответствующих частот модуляции тягового преобразователя. В результате получены диапазоны частот модуляции, при которых наблюдается максимальное относительное улучшение характерных для данных систем показателей ЭМС и которые могут быть рекомендованы для дальнейшего применения при условии расширения внедрения в эксплуатацию электровозов рассматриваемого типа.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электроподвижной состав, асинхронный привод, частота модуляции.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Андриенко П. Д.*

UDC 629.423.31:621.313.333

YU. S. BONDARENKO (DNURT)

Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 373-15-47, e-mail: bondar198924@gmail.com

EXPERIMENTAL INVESTIGATION THE INFLUENCE TRACTION CONVERTERS MODULATION FREQUENCY OF DC ELECTRIC LOCOMOTIVES WITH ASYNCHRONOUS DRIVE ON ADJACENT SYSTEM

As of 01.01.2011, among the total operational length of electrified railways of Ukraine (9877 km), about half of them (4764 km) is electrified with direct current. At the same time a replacement these parts by parts with alternating current requires significant investment. With this in mind, to enhance the efficiency of the operation of DC railways there is a tendency to introduce into operation of electric rolling stock with asynchronous traction drive, a feature of which is a static frequency converter.

Appearance in the structure of energy transformation of DC electric traction network a fundamentally new traction unit causes an increased interest from the point of view of its interaction with the adjacent systems of electric railways, as well as in terms of possible ways to improve it. The paper considers the possibility of improving the electromagnetic compatibility (EMC) of the considered traction units with signaling systems and the network of external power supply by choosing a corresponding modulation frequency of traction converter. As a result were obtained the ranges of modulation frequency by using which can be obtained a maximum relative improvement of EMC indexes with considered systems and which can be recommended for the further applying at condition the further expansion to implementation of these types of locomotives.

Keywords: electromagnetic compatibility, electric rolling stock, asynchronous drive, modulation frequency.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Andrienko P. D.*

© Бондаренко Ю. С., 2014

М. Б. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСЬКА, С. Ю. БАЙДАК (ДНУЗТ)

Кафедра «Проектування і будівництво доріг», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 48, ел. пошта kunibor@mail.ru

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ТИПІВ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Вступ

Потреби економіки держави та попит населення вимагають сучасного рівня транспортного забезпечення, впровадження нових технологій перевезень, рухомого складу нового покоління з більш високим рівнем якісних, технічних та економічних показників експлуатації.

На сьогодні пропускна спроможність окремих ділянок та напрямків залізниць не задовольняє вимогам щодо обсягів та швидкості вантажних перевезень, а суміщений рух вантажних і пасажирських поїздів по одних і тих же ділянках стримує впровадження швидкісного руху.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є реалізація Програми електрифікації залізниць України на 2011-2016 рр., що дозволить підвищити економічну ефективність залізничного транспорту, зменшити негативний вплив на навколишнє природне середовище, забезпечити високі соціальні стандарти транспортних послуг [1].

Програма передбачає електрифікацію 1562 км експлуатаційної довжини залізничних колій на ділянках, що входять у напрямки розмежування руху пасажирських і вантажних поїздів та на ділянках впровадження швидкісного руху. Сума інвестицій складе понад 17 млрд. грн., а річний економічний ефект капітальних вкладень з урахуванням прогнозу росту цін на енергоносії очікується 2,1 млрд. грн.

Що стосується рухомого складу, то ситуація надто складна, близько 70% магістральних електровозів вже пододало призначений виробником 30-річний термін їх служби. Активна електрифікація залізничних ліній, що проводиться Укрзалізницею, потребує додаткового збільшення експлуатаційного парку електровозів, особливо змінного струму.

В рамках виконання «Програми оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012-2016 рр.» [2] заплановано поставити 230 електровозів серії 2ЕЛ4 на Донецьку залізницю, 70 електровозів 2ЕЛ5 на Одеську залізницю, 50 електровозів 2ЕС10 (7 на Донецьку і 43

на Львівську) і 110 електровозів ВЛ11М/6 на Придніпровську залізницю (рис. 1).

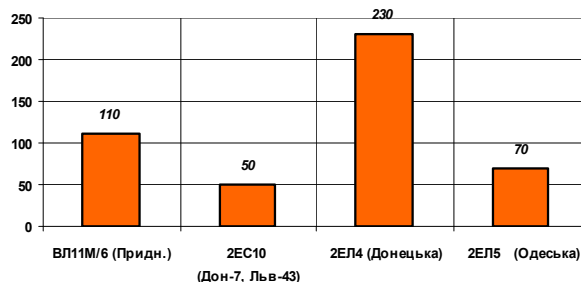


Рис. 1. План поставок електровозів

Вантажні електровози постійного струму ВЛ11 М/6 потужністю 4600 кВт та конструкційною швидкістю 100 км/год виробляє Тбіліський електровозобудівний завод (ТЕВЗ).

ВАТ «ХК «Луганськтепловоз» виготовляє магістральні вантажні електровози постійного струму 2ЕЛ4 потужністю 6400 кВт і конструкційною швидкістю 120 км/год для заміни електровозів ВЛ8 і ДЕ1.

Для заміни вантажних електровозів ВЛ8 «ХК «Луганськтепловоз» виготовляє електровози змінного струму 2ЕЛ5 потужністю тривалого режиму 6120 кВт і конструкційною швидкістю 120 км/год.

Представляється доцільним дослідити, за яких умов слід впроваджувати електричну тягу замість тепловозної, а також ефективність заміни застарілих ВЛ8 новими 2ЕЛ4 і ВЛ80 на 2ЕЛ5.

Методика дослідження

Розглянемо тягові характеристики вище названих локомотивів. На рис. 2-5 наведено порівняння тягових характеристик існуючого локомотивного парку (тепловоз 2ТЕ116 та електровози ВЛ8, ВЛ80) та перспективних локомотивів (електровози 2ЕЛ4 та 2ЕЛ5), а також криві повного питомого опору руху при різних ухилах з розрахунковою масою поїзда 3000 т.

Швидкість руху поїзда на достатньої довжини елементі поздовжнього профілю залежить від типу локомотива, маси поїзда і загального опору руху. Для виявлення сталої швидкості на різних за крутизною елементах поздовжнього профілю скористаємося сполученими графіка-

ми $F_k(V)$ – тягова характеристика локомотива і $W(V)$ – крива загального опору руху.

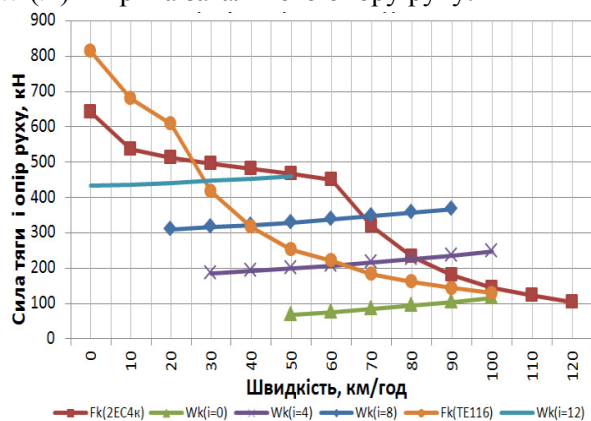


Рис. 2. Локомотиви 2ТЕ116, 2ЕЛ4

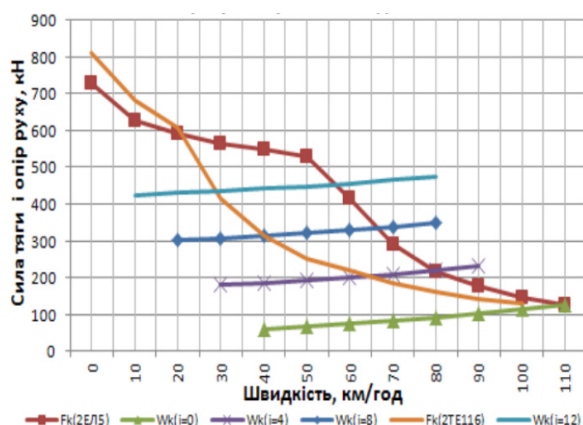


Рис. 3. Локомотиви 2ТЕ116, 2ЕЛ5

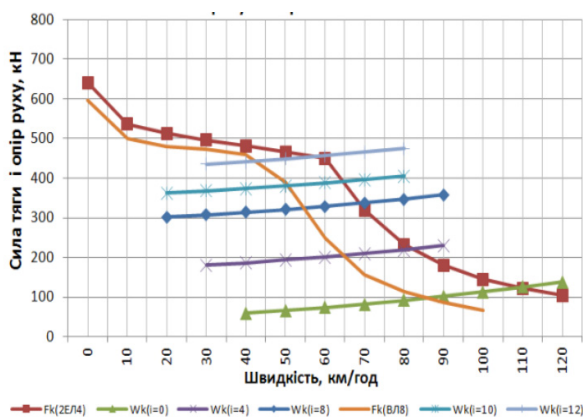


Рис. 4. Локомотиви ВЛ8, 2ЕЛ4

Загальний опір руху складається з основного опору руху W_o , опору від ухилу W_i і опору від кривизни колії W_r . [1]: $W = W_o + W_i + W_r$.

Абсциса точки перетину графіків $F_k(V)$ і $W(V)$ відповідає сталій швидкості руху поїзда на ухилі i .

Відомо, що переваги електричної тяги найбільше проявляються на крутих затяжних підйомах. Значення сталої швидкості для ухилів 8, 12 і 14 ‰ наведені в табл. 1.

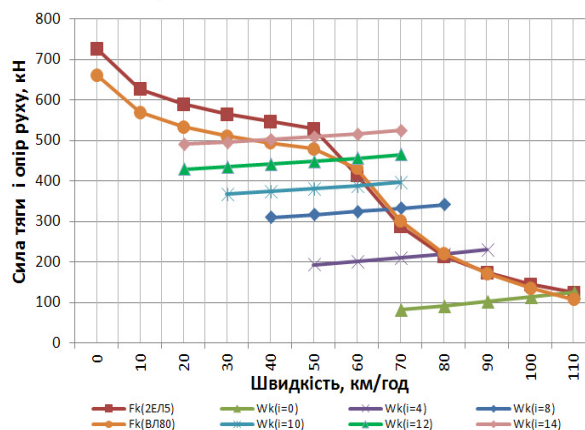


Рис. 5. Локомотиви ВЛ80, 2ЕЛ5

Таблиця 1

Стала швидкість на крутих підйомах для різних локомотивів

Ухил, ‰	Стала швидкість, км/год			Зростання швидкості, разів	
	2ТЕ116	2ЕЛ4	2ЕЛ5	2ТЕ116-2ЕЛ4	2ТЕ116-2ЕЛ5
8	40	70	67	1.75	1.68
12	28	60	56	2.14	2.00
	ВЛ8	2ЕЛ4		ВЛ8-2ЕЛ4	
8	55	70		1.27	
12	40	60		1.50	
	ВЛ80		2ЕЛ5		ВЛ80-2ЕЛ5
8	67		67		1.00
12	55		57		1.04
14	40		52		1.30

З аналізу рис. 2-5 і табл. 1 випливає, що вантажний поїзд однакової маси 3000 т з локомотивом 2ЕЛ4 і 2ЕЛ5 рухається з швидкістю в 1,7 і 2 рази швидше на ухилах 8 і 12‰ відповідно у порівнянні з тепловозною тягою.

Заміна існуючих електровозів ВЛ8 на нові 2ЕЛ4 дає можливість за тих же умов збільшити швидкість в 1,3 і 1,5 рази відповідно на ухилах 8 і 12‰.

Заміна існуючих електровозів ВЛ80 на нові 2ЕЛ5 дає переваги тільки на підйомах більших за 12‰, що пояснюється співпаданням кривих сили тяги $F_k(V)$ в діапазоні швидкостей 60-110 км/год (рис. 5). Так, при $i=12$ ‰ стала швидкість зростає на 5%, при $i=14$ ‰ – на 30%.

Для визначення факторів, які впливають на енергетичні витрати, розглянемо рівняння руху поїзда

$$F_k = m a + W_o + W_i + W_r. \quad (1)$$

У виразі (1) F_k – сила тяги локомотива; m – маса поїзда; a – прискорення поїзда; W_o – сила основного опору руху; W_i , W_r – сили додаткового опору руху відповідно від ухилів і кривизни колії.

Значення основного і додаткових опорів руху, визначаються для кожного рухомого складу емпірично за даними [3, 4].

Аналізуючи різні технології енергозбереження [5, 6], робимо висновок, що одним із основних шляхів є зменшення витрат на тягу поїздів, тобто зменшення складових частин, що входять до формули (1).

Витрати на тягу поїздів залежать від багатьох факторів серед яких одним з основних можна вважати режим ведення поїзда. Зміна режиму веде до різної механічної роботи сили тяги локомотива, яка залежить від технічного стану верхньої будови колії, параметрів поздовжнього профілю, плану лінії тощо. І якщо профіль залізниці практично не змінюється при проведенні модернізації залізничної колії, то параметри плану лінії корегуються з метою підвищення швидкості руху поїздів [7].

При відомій силі тязі, що витрачається на тягу поїздів, можна визначити механічну роботу локомотива на ділянці довжиною L

$$R_m = \int_l F_k ds, \quad (2)$$

де l – частина ділянки L , на якій сила тяги локомотива $F_k > 0$.

До ділянок l відносяться ділянки розгону, а також ділянки, на яких поїзд рухається з постійною швидкістю на підйомах, площадках і спусках, якщо сила додаткового опору руху від ухилу W_i і кривизни колії W_r не перевищує

величини основного опору руху, тобто $(W_i + W_r) < W_o$. Основний опір руху має місце при русі поїзда по прямій і горизонтальній колії, і, в свою чергу, залежить від тертя кочення і ковзання коліс по рейкам, втрат живої сили від ударів і коливань, тобто в кінцевому підсумку – від стану рухомого складу і колії.

Визначивши механічну роботу локомотива R_m і врахувавши коефіцієнт корисної дії електровоза η , визначаються витрати електроенергії на тягу поїзда [5]:

$$E = \frac{R_m}{\eta},$$

або

$$E = \left(\int_{l_1} W_o ds + \int_{l_2} W_i ds + \int_{l_3} W_r ds + \int_{l_4} mads \right) \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

В роботі було досліджено, як змінюється енергоємність вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Для порівнянності результатів була прийнята в одному варіанті однакова маса вантажного поїзда 3000 тонн, в іншому – маса поїзда визначалась потужними можливостями локомотива (див. табл. 2).

Як впливає з графіків (рис. 2-5) і підтверджується результатами тягових розрахунків для перегону, що має обрис затяжного підйому, витрати електроенергії при зростанні швидкості теж збільшуються (табл. 2). Але при цьому в 1,4-1,5 рази зменшується час руху вантажного поїзда, що має велике значення для підвищення пропускної спроможності, перш за все, одноколійних ділянок.

Таблиця 2

Тягово-енергетичні розрахунки

Найбільший ухил, %	Напрямок руху	Довжина, м	V_{max} , км/год	$V_{сер}$, км/год	Витрати елект., кВт-год	Мех роб., ткм	Робота гальм, ткм	Час руху, хв	A_o^* , кг/км	Вартість, грн/ 1 км	Кількість поїздів
2ТЕ116, Q = 3500 т											
i=12	непарн.	14500	32	30	451,7	584,5	30,4	28,76	31,15	186,9	4490
	парний	14500	86	76	48,7	64,3	372,6	11,52	3,36	20,2	
2ЕЛ4к, Q = 3350 т											
i=12	непарн.	14500	56	46	2884,9	749,6	45,8	18,91	198,96	159,2	4691
	парний	14500	85	77	247,5	63,9	498,5	11,32	17,07	13,7	
2ЕЛ5к, Q = 3700 т											
i=12	непарн.	14500	45	37	3164,8	791,9	48,4	23,54	218,26	174,6	4247
	парний	14500	85	77	261,1	67,4	544,5	11,37	18,01	14,4	
2ТЕ116, Q = 3500 т											
i=12	непарн.	14500	25	24	570,2	731,3	28,4	36,42	39,32	235,9	4490
	парний	14500	86	76	40,3	53,1	516,9	11,47	2,78	16,7	

Найбільший ухил, ‰	Напряму руху	Довжина, м	V_{\max} , км/год	$V_{\text{сер.}}$, км/год	Витрати електр., кВт·год	Мех роб., ткм	Робота гальм., ткм	Час руху, хв	A_0^* , кг/км	Вартість, грн/ 1 км	Кількість поїздів
2ЕЛ4к, Q = 3500 т											
i=12	непарн.	14500	31	27	2572,9	724,0	18,5	32,52	177,44	142,0	4490
	парний	14500	90	76	212,1	65,1	533,7	11,44	14,63	11,7	
2ЕЛ5к, Q = 3500 т											
i=12	непарн.	14500	55	43	3017,6	775,1	45,6	20,30	208,11	166,5	4490
	парний	14500	85	77	253,9	65,5	518,1	11,34	17,51	14,0	
2ТЕ116, Q = 4500 т											
i=9	непарн.	14500	26	24	564,5	724,3	30,1	36,04	38,93	233,6	3492
	парний	14500	86	75	283,3	87,2	466,1	11,63	19,54	117,2	
2ЕЛ4к, Q = 4500 т											
i=9	непарн.	14500	32	27	2559,7	721,6	43,3	32,57	176,53	141,2	3492
	парний	14500	86	75	283,3	87,2	466,1	11,63	19,54	15,6	
2ЕЛ5к, Q = 4500 т											
i=9	непарн.	14500	54	41	3055,3	778,3	78,5	21,45	210,71	168,6	3492
	парний	14500	86	75	338,2	87,6	468,6	11,53	23,32	18,7	
ВЛ8, Q = 3000 т											
i=12	непарн.	14500	46	38	2010	650,0	37,9	22,73	138,62	110,9	5238
	парний	14500	89	76	150,3	48,6	440,0	11,40	10,37	8,3	
2ЕЛ4к, Q = 3000 т											
i=12	непарн.	14500	57	44	2135,5	674,1	56,9	19,65	147,28	117,8	5238
	парний	14500	85	77	194,8	59,8	451,9	11,33	13,43	10,7	
2ЕЛ4к, Q = 3200 т											
i=12	непарн.	14500	47	38	2270,6	693,4	40,3	23,13	156,59	125,3	4911
	парний	14500	85	77	201,2	61,7	478,8	11,36	13,88	11,1	
ВЛ8, Q = 4000 т											
i=9	непарн.	14500	44	34	2082,7	670,5	42,3	25,54	143,63	114,9	3929
	парний	14500	86	75	205,7	66,6	405,2	11,64	14,19	11,3	
2ЕЛ4к, Q = 4000 т											
i=9	непарн.	14500	50	39	2241,7	689,9	44,6	22,49	154,60	123,7	3929
	парний	14500	86	75	265,5	81,8	422,1	11,53	18,31	14,6	
2ЕЛ4к, Q=4200 т											
i=9	непарн.	14500	43	34	2348,5	702,0	44,5	25,54	161,97	129,6	3741
	парний	14500	86	75	272,3	83,8	438,6	11,57	18,78	15,0	
ВЛ80, Q = 3350 т											
i=12	непарн.	14500	45	37	2697,5	718,8	43,9	23,48	186,03	148,8	4691
	парний	14500	85	77	231,0	62,9	497,4	11,37	15,93	12,7	
2ЕЛ5к, Q = 3350 т											
i=12	непарн.	14500	56	46	2884,9	749,6	45,8	18,91	198,96	159,2	4691
	парний	14500	85	77	247,5	63,9	498,5	11,32	17,07	13,7	
ВЛ80, Q = 4300 т											
i=9	непарн.	14500	45	36	2713,7	722,1	48,0	24,32	187,15	149,7	3654
	парний	14500	86	75	309,7	84,4	449,0	11,56	21,36	17,1	
2ЕЛ5к, Q = 4300 т											
i=9	непарн.	14500	56	44	2931,5	757,0	77,6	19,75	202,17	161,7	3654
	парний	14500	86	76	330,5	85,6	449,8	11,50	22,79	18,2	

Примітка: *) для тепловозної тяги – кг/км, для електричної – кВт·год/км

Висновки

Вартість електроенергії на тягу поїздів в середньому 1,3-1,5 рази менша ніж вартість дизельного палива при тепловозній тязі (в залежності від співвідношення вартості 1 тонни палива і 1000 кВт-год електроенергії). Крім того, економія досягається за рахунок збільшення маси вантажних поїздів при впровадженні нових, більш потужних типів електровозів. Отже, один і той же обсяг перевезень можна освоїти пар-

ком електровозів меншим, ніж парк тепловозів. Собівартість перевезень також не на користь існуючого рухомого складу.

При встановленні ефективності електровозів нового покоління слід також враховувати, що їхня потужність не використовується в повній мірі із-за обмеження норми маси довжиною прийнятно-відправних колій, а швидкості руху часто обмежуються станом колійного господарства перегонів і станцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Програма електрифікації залізниць України на 2011-2016 рр. / Затв. наказом Укрзалізниці від 10.06.2011 р. № 274-Ц. – К., 2011.
2. Програма оновлення локомотивного парку залізниць України на 2012-2016 рр. / Затв. постановою Кабінету Міністрів України від 01.08.2011 р. №840. – К., 2011.
3. Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.
4. Гребенюк, П. Т. Тяговые расчеты: Справочник / Под ред. П. Т. Гребенюка. – М.: Транспорт, 1987. – 272 с.
5. Мутинштейн Л. А. Метод постоянных перегонных скоростей для оценки энергозатрат на тягу поездов / Л. А. Мутинштейн, А. В. Лохач, С. А. Виноградов, Т. В. Виноградова, И. И. Мерман // Вестник ВНИИЖТ. – № 4. – 2000. – С. 16-19.
6. Корженевич І. П. Вплив підвищення швидкості руху поїздів на витрати енергоресурсів / І. П. Корженевич, М. Б. Курган, Ю. С. Бараш, Д. М. Курган // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – Вип. 20. – С. 233-239.
7. Курган М. Б. Системний підхід до вирішення задачі енергозбереження в колійному господарстві / М. Б. Курган, С. Ю. Байдак, Н. П. Хмелевська // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11 червня – 14 липня 2013 р.) – Д.: ДНУЗТ, 2013. – С. 59-60.

Надійшла до друку 22.10.2014.

REFERENCES

1. *Prohrama elektryfikatsiyi zaliznyts' Ukrayiny na 2011-2016 rr.* [Program of electrification the railways of Ukraine for 2011-2016]. Kyiv, 2011.
2. *Prohrama onovlennya lokomotyvnoho parku zaliznyts' Ukrayiny na 2012-2016 rr.* [Locomotive fleet renewal program railways of Ukraine for 2012-2016]. Kyiv, 2011.
3. *Pravila tyagovykh raschetov dlya poezdnoy raboty* [Terms traction calculations for train operation]. Moscow, Transport Publ., 1985. 287 p.
4. Grebenyuk P. T. *Tyagovye raschety: Spravochnik* [Traction calculations: Guide]. Moscow, Transport Publ., 1987. 272 p.
5. Mutinshteyn L. A., Lohach A. V., Merman I. I., Vinogradov S. A., Vinogradova T. V. *Metod postoyannykh peregonnykh skorostey dlya otsenki energozatrat na tyagu poezdov* [Constant boiling speeds to assess energy for traction]. – *Vestnik VNIIZhT* [Bulletin of VNIIZhT], 2000, issue 4, pp. 16-19.
6. Korzhenevich I. P., Kurgan M. B., Barash Yu. S., Kurgan D. M. *Vpliv pidvischennya shvidkosti ruhu poyizdiv na vitrati energoresursiv* [The impact of increasing the speed of trains on energy costs]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2008, issue 20, pp. 233-239.
7. Kurhan M. B., Baidak S. Yu., Khmelevska N. P. *Systemnyy pidkhid do vyrishennya zadachi enerhozberezhennya v koliynomu hospodarstvi* [The systems approach to solving the problem of energy conservation in railroad facilities]. *Materialy IV Mizhnarodnoyi naukovopraktychnoyi konferentsiyi "Enerhozberezhennya na zaliznychnomu transporti i v promyslovosti (Volovets', 11.06 – 14.06.2013)"* [Proc. of the 4th Int. Scientific and Practical Conf. "Energy efficiency on railway transport and in industry"]. Dnipropetrovsk, 2013, pp. 59-60.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Панасенко М. В.*

В даній статті розглянуто питання зміни енергоємності вантажного поїзда, що рухається на різних за крутизною підйомів ділянках залізниці. Досліджуються умови за яких слід впроваджувати електричну тягу замість тепловозної, а також ефективність заміни застарілого парку електровозів як змінного, так і постійного струму. Для досягнення мети дослідження проаналізовано парк локомотивів, які експлуатуються на даний час, використано математичне моделювання руху поїздів та визначено основні тягово-енергетичні показники для різних серій локомотивів. За результатами розрахунків зроблено висновок про доцільність переведення магістральних ліній (особливо одноколіїних) на електричну тягу та умови, за яких впровадження сучасних локомотивів ефективне.

Ключові слова: електрифікація, тягова характеристика, енергоємність, постійний струм, змінний струм.

УДК 629.423.1.016.3

Н. Б. КУРГАН, Н. П. ХМЕЛЕВСКАЯ, С. Ю. БАЙДАК (ДНУЖТ)

Кафедра «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел./факс +38 (056) 373 15 48, эл. почта kunibor@mail.ru

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В данной статье рассмотрены вопросы изменения энергоёмкости грузового поезда, движущегося на разных по крутизне подъёмов участках железной дороги. Исследуются условия, при которых следует внедрять электрическую тягу вместо тепловозной, а также эффективность замены устаревшего парка электровозов как переменного, так и постоянного тока. Для достижения цели исследования проанализированы парк локомотивов, которые эксплуатируются в настоящее время, использовано математическое моделирование движения поездов и определены основные тягово-энергетические показатели для различных серий локомотивов. По результатам расчетов сделан вывод о целесообразности перевода магистральных линий (особенно однопутных) на электрическую тягу и условия, при которых введение современных локомотивов эффективно.

Ключевые слова: электрификация, тяговая характеристика, энергоёмкость, постоянный ток, переменный ток.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Панасенко Н. В.*

UDC 629.423.1.016.3

M. B. KURHAN, N. P. KHMELEVSKA, S. Y. BAIDAK (DNURT)

Department «Engineering And Construction Of Roads», Dnipropetrovsk National University Of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, Tel./Fax +38 (056) 373 15, e-mail kunibor@mail.ru

IMPLEMENTATION OF NEW ELECTRIC LOCOMOTIVES

This article examines the questions of energy intensity of freight train moving at different sites on the steepness of the ascent of the railway. We investigate the conditions under which should be introduced in place of diesel electric propulsion, as well as the effectiveness of the replacement of obsolete electric locomotives both AC and DC. To achieve the objectives of the study analyzed the fleet of locomotives that operate at the moment, used mathematical modeling of trains and the main trailer energy indicators for the various series of locomotives. The calculations concluded feasibility translation trunk lines (especially the single track) for electric traction and the introduction of modern locomotives

Keywords: electrification, traction characteristics, energy consumption, direct current, alternating current.

Internal reviewer *Getman G. K.*

External reviewer *Panasenko M. V.*

М. В. ХВОРОСТ, К. О. СОРОКА, М. І. ШПІКА, А. І. БЕСАРАБ (ХНУМГ)

Кафедра електричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства
ім. О. М. Бекетова, вул. Революції, 12, м. Харків, 61002, тел.: (057) 707-32-73,
ел. пошта: dekanatzn@ksame.kharkov.ua

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ З УРАХУВАННЯМ ВИХРОВИХ СТРУМІВ

Вступ

Основним напрямком вирішення проблеми енергозбереження на електричному транспорті є зменшення втрат у системі керування тяговим електроприводом: двигун – керуючий пристрій. Процеси у цій системі досить складні і їх оптимізація потребує глибокого теоретичного вивчення. Найбільш перспективним методом вивчення є моделювання на основі диференціальних рівнянь.

Як один із засобів моделювання використовується [1] пакет Simulink програмного середовища MatLab. Побудова моделей в цьому пакеті розглянута в ряді робіт і створена велика кількість моделей [1-3]. Проте, для вирішення кожного конкретного завдання придатні тільки ті моделі, які задовольняють вимогам, що витікають з поставлених завдань.

Постановка задач дослідження

В цій роботі розглянута побудова моделей для вирішення завдань оптимізації системи двигун – пристрій керування з точки зору економії електроенергії транспортними засобами. Метою роботи є розробка моделі електродвигунів тягового приводу з урахуванням вихрових струмів, яка дозволяє провести дослідження властивостей цих двигунів при різних типах систем збудження.

Крім того, додатковою метою роботи є допомога спеціалістам електротранспорту в засвоєнні методів моделювання та використання вже створених моделей у своїй практичній діяльності.

Основна частина

Найбільш масовим двигуном рухомого складу електротранспорту є двигун послідовного збудження. Перевагою його є великий початковий момент та широкий діапазон регулювання обертового моменту. В трамваях, які експлуатуються, використовується двигун типу ТЕ-022 та його модифікації. Робочий діапазон двигуна знаходиться в межах лінійної ділянки

кривої намагнічування сталі. Розглянемо побудову найпростішої лінійної моделі. Електрична схема заміщення двигуна представлена на рис. 1.

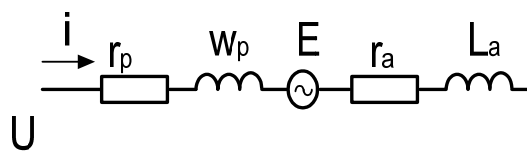


Рис. 1. Електрична схема заміщення двигуна послідовного збудження

Динаміка двигуна описується системою рівнянь (1). Тут прийнято, що індуктивність якоря L_a постійна і не залежить від величини магнітного потоку.

$$\begin{cases} U = r_p i + r_a i + L_a \frac{di}{dt} + 2 p w_p \xi \frac{d\Phi}{dt} + C\Phi\omega; \\ J \frac{d\omega}{dt} = C\Phi i - M_c; \\ \Phi = k \cdot w_p i. \end{cases} \quad (1)$$

Після підстановки третього рівняння системи в перше та переходу в область зображень, знаходимо

$$i(s) \left(Ts + \frac{r_a + r_p}{r_p} \right) = \frac{1}{r_p} U(s) - \frac{C}{r_p} \Lambda(\Phi\omega), \quad (2)$$

де s – оператор похідної, $T = (L_a + L_p) / r_p$;

$L_p = 2 p w_p^2 \xi \cdot k$; $\Lambda(\Phi\omega)$ – зображення за Лапласом добутку функцій.

Абзац основного тексту статті з декількох пропозицій.

Відповідно до зауважень [4], рівнянню (2) відповідає фрагмент моделі, який представлений на рис 2, а.

З другого рівняння системи (1) після переходу в область зображень, отримаємо

$$\omega(s) = C \frac{k_w p}{J_s} \Lambda(i^2) - \frac{1}{J_s} M_C(s). \quad (3)$$

В моделі величині $\Lambda(i^2)$ відповідає величина струму в квадраті, що одержується за допомогою блоку множення. Фрагмент моделі, який відповідає рівнянню (3) представлений на рис. 2, б.

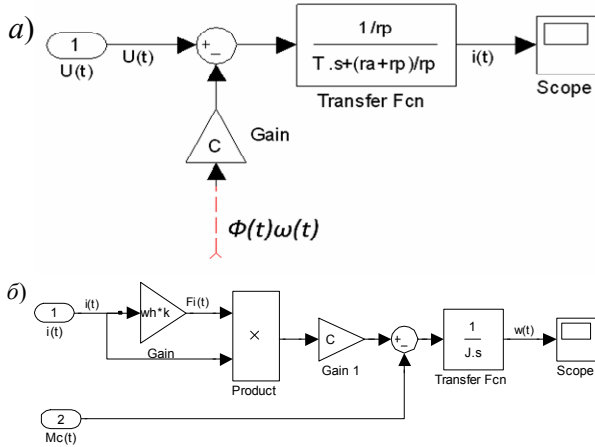


Рис. 2. Фрагменти моделі двигуна послідовного збудження

Шляхом об'єднання фрагментів одержуємо потрібну модель двигуна постійного струму з послідовним збудженням (рис.3).

Підставляючи конкретні значення можна одержати модель конкретного двигуна. На рис. 4 приведено електромеханічні характеристики двигуна ТЕ-022 трамваю, які одержані за розробленою моделлю.

Наступним кроком виконаємо моделювання двигуна змішаного керування з врахуванням вихрових струмів. В електричному транспорті

використовуються двигуни потужністю порядку 100 кВт і більше. Властивістю їх є помітний вплив вихрових струмів на електричні процеси в двигуні. Основну долю складають вихрові струми в масивній станині [5].

Вихрові струми можна розрахувати з рівнянь Максвелла для електромагнітного поля згідно закону електромагнітної індукції [6]:

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (4)$$

Рівняння визначає електричне поле, яке виникає при зміні індукції магнітного поля. Це електричне поле викликати вихрові струми. Їх величина визначається формулою (5), де r – питома провідність,

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{r}. \quad (5)$$

Оскільки станина виконана з суцільного металу, вихрові струми сусідніх контурів складуються, і утворюється тільки один контур струму L , який охоплює весь поперечний розріз станини. Для розрахунку величини струму вздовж контуру L можна скористатись рівнянням електромагнітної індукції в інтегральній формі:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6)$$

а величина вихрового струму буде рівна сумарній електрорушійній силі, поділений на опір R_L контуру L ,

$$i_L = \frac{1}{R_L} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (7)$$

де Φ – магнітний потік двигуна.

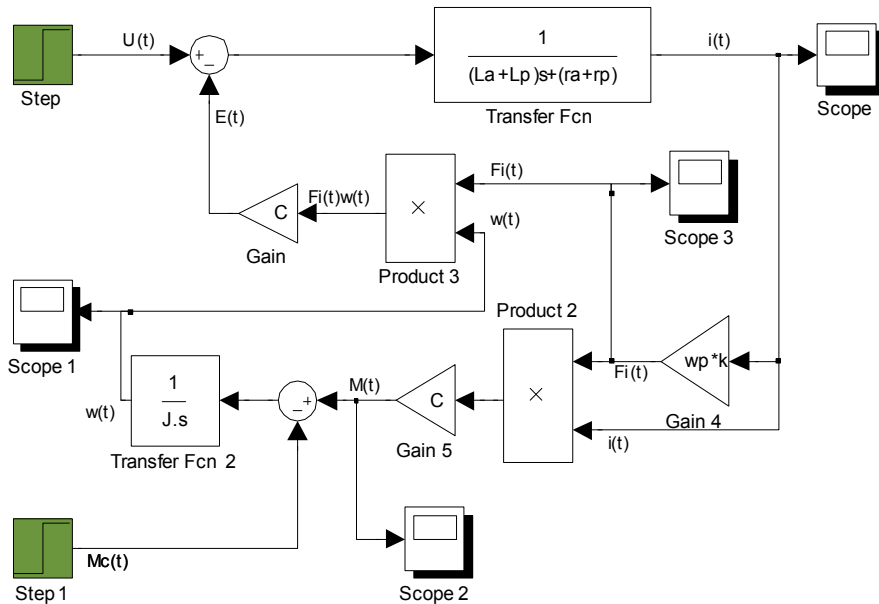


Рис. 3. Модель двигуна постійного струму послідовного збудження

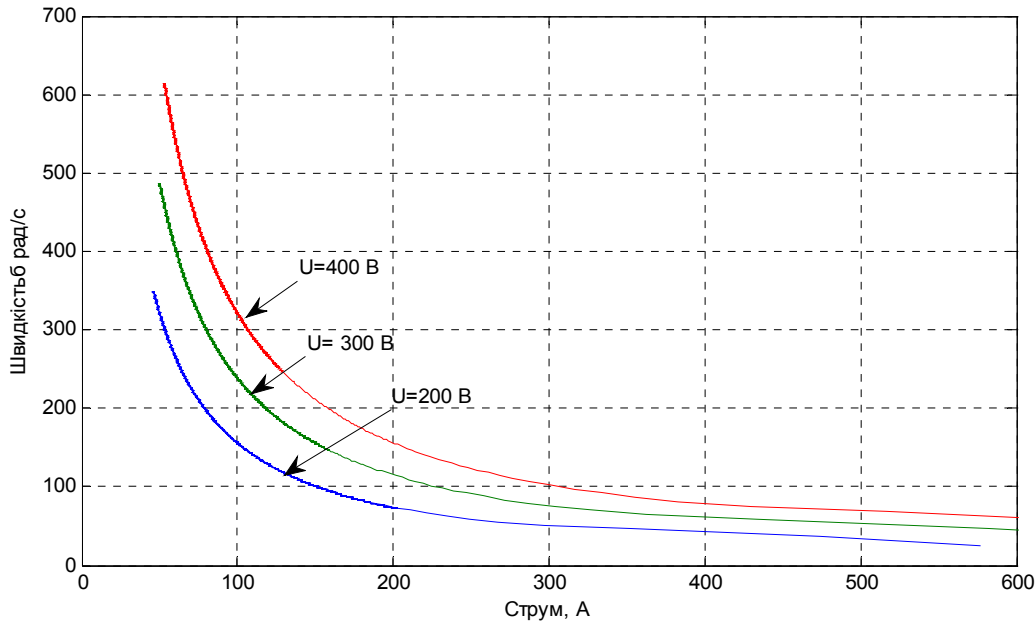


Рис. 4. Електромеханічні характеристики двигуна GE-022

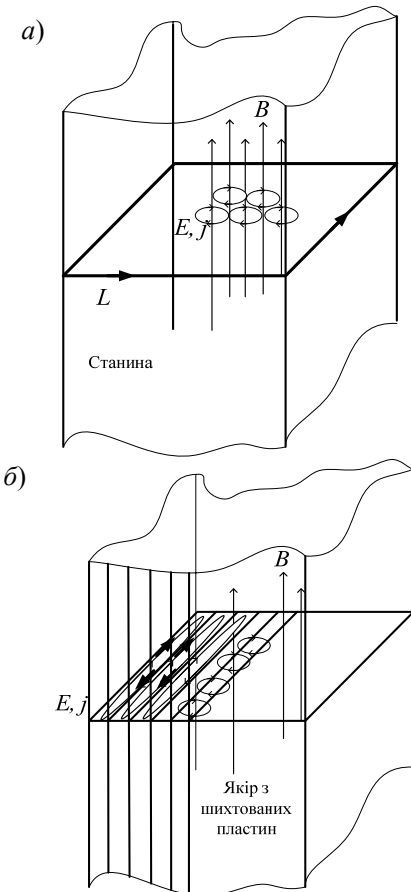


Рис. 5. Схема вихрових струмів у станині і у шихтованому якорі двигуна

Магнітний потік у станині двигуна пульсуючий, тобто основна частина – постійний магнітний потік двигуна. Додаткові складові зумовлені перехідними процесами під час пуску та зміни зовнішнього навантаження; впливом якоря та його комутації колектором.

Магнітний потік якоря змінюється в результаті перемагнічування під час комутації. Закон, яким можна наближено описати цю зміну, має вигляд

$$\Phi_{\text{я}}(t) = \Phi(t) \sin(\omega t). \quad (8)$$

Зміну магнітного потоку якоря (8) наближено описано у вигляді синусоїди, хоча конструкція сучасних двигунів забезпечує магнітний потік, який має вигляд трапецій з різким переходом під час комутації і майже постійною величиною після комутації [5]. Оскільки якорь двигунів постійного струму, як правило, шихтований, то вихрові струми зосереджуються в окремих пластинах якоря, весь контурний вихровий струм розбивається на струми в окремих пластинах. Величина цих струмів незначна і в багатьох випадках не враховується [6].

При моделюванні двигуна прийнято спрощену модель [1], коли враховуються тільки вихрові струми в станині, як струми додаткової обмотки w_k з одним витком. Параметром цієї обмотки є постійна часу T_k . Схема заміщення двигуна з врахуванням вихрових струмів приведена на рис. 6.

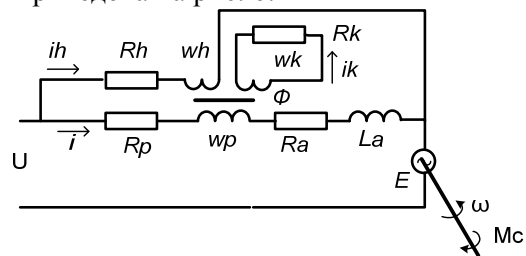


Рис. 6. Електрична схема заміщення двигуна постійного струму змішаного збудження

$$\left\{ \begin{aligned} U &= i r_a + i r_p + L_a \frac{di}{dt} + 2 p w_p \xi \frac{di}{dt} + E; \\ U &= r_h i_h + 2 p w_h \xi \frac{d i_h}{dt}; \\ 2 p w_k \xi \frac{d i_k}{dt} &= i_k \cdot r_k; \\ F &= i + i_h - i_k; \\ E &= C \Phi \omega; \\ M &= C \Phi i; \\ \Phi &= f(F); \\ M - M_c &= J \frac{d\omega}{dt}. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Система рівнянь (9) описує роботу двигуна змішаного збудження з урахуванням вихрових струмів

Модель двигуна, що відповідає цій системі рівнянь приведена на рис. 7.

Висновки

Одержані моделі дозволяють моделювати електродвигуни постійного струму різних типів збудження під час вирішення завдань енергозбереження тягових електроприводів рухомого складу електротранспорту, що експлуатуються в наш час.

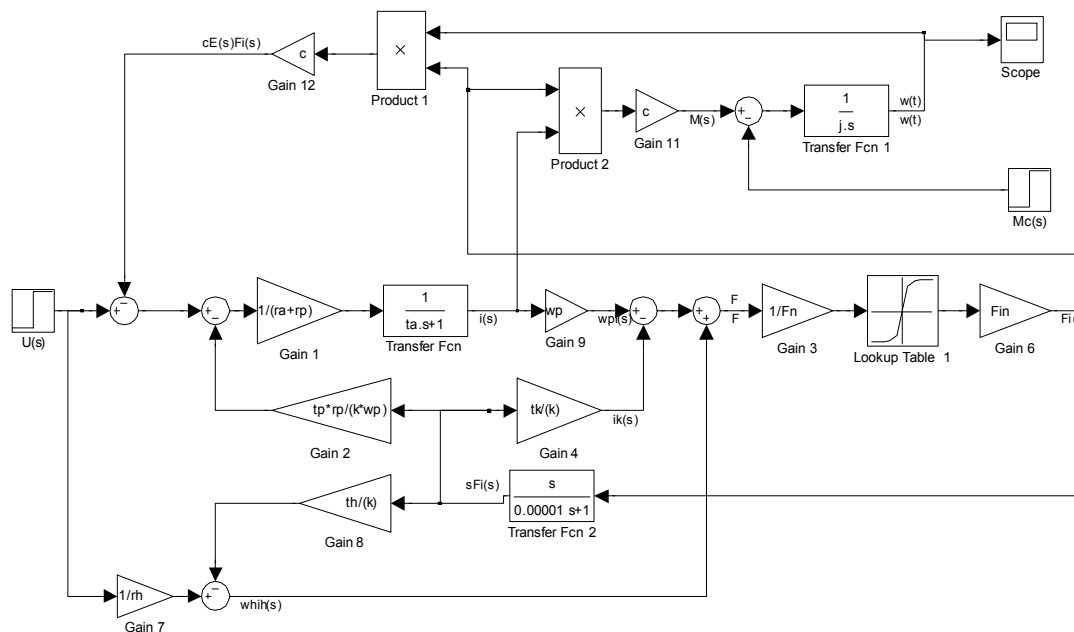


Рис. 7. Модель двигуна постійного струму змішаного збудження з врахуванням нелінійної залежності магнітного потоку та впливу вихрових струмів в станині

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Костюк Л. Д та ін. Моделювання електроприводів. – Львів: Львівська політехніка, 2004. – 404 с.
2. Черных И. В. SimPowerSystems. Моделирование электромеханических устройств и систем в Simulink / И. В. Черных. – СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
3. Сорока К.О., До питання розробки моделей електродвигунів тягового електроприводу транспортних засобів / К. О. Сорока, Н. В. Хворост, А. І. Бесараб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 5(8). - С. 45-49.
4. Шевченко В. П. Машины змінного струму / В. П. Шевченко, Белікова Л. Я. – Одеса: Наука і техніка 2005. – 272 с.
5. Дмитриевский В. А Исследование индукционных машин с разомкнутым магнитопроводом на основе теории поля и теории цепей: специальность автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Екатеринбург, 2007. – 18 с.
6. Копылов И. П. Математическое моделирова-

REFERENCES

1. Kosteyk L.D. I dr. Modeleyvannia elektroprivodiv. [Modeling of electric drives] – Lviv: Lvivska politexnika, 2004, 404 p.
2. Chernix I.V. SimPowerSystems Modelirovanie elektromexanicheskix ustroistv i sistem v Simulink [Modeling of electromechanical devices and systems in Simulink]. Saint Petersburg, Piter print Publ., 2008, 288 p
3. Soroka K.O., Xvorost N. V., Besarab A.I. Do pitannia rozrobki modeley elektrodviguniv tiagovogo elektroprivodu transportnix zasobiv. [To the question of developing models of electric traction electric drive means of transport] Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2013, no. 5(8), pp. 45-49.
4. Shevchenko V.P., Belikova L.Y. Mashini zminnogo strumu. [Machines AC] Odessa: Nauka I texnika 2005, 272 p.
5. Dmitrievskiy V.A. Issltdovanie indukcionnix mashin s razomknutim magnitoprovodom na osnove teorii pola I teorii cepey: specialnost avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk. [Investigation of of induction ma-

ние электрических машин / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.

chines with open magnetic circuit on the basis of field theory and circuit theory]. Ekaterenburg, 2007, 18 p.

6. Kopilov I.P. Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin. [Mathematical modeling of electrical machines] – М.: Vissh.sh., 2001, 327 p.

Надійшла до друку 27.10.2014.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Саєнко Ю. Л.*

Розглянуто питання моделювання тягових електродвигунів в пакеті Simulink. Показана процедура переходу від математичних рівнянь, що описують модель, до імітаційної моделі у системі Matlab, що дозволить отримувати будь-які характеристики ще на етапі розробки.

Запропоновані моделі двигунів постійного струму послідовного та змішаного збудження, особливістю яких є врахування реальних кривих намагнічування. Отримана модель тягового двигуна може бути використана для проведення оптимізації режимів роботи тягового електроприводу з точки зору енергозбереження, оскільки враховує параметри на які може оказувати вплив система керування.

Розроблена модель двигуна постійного струму змішаного збудження з врахуванням нелінійної залежності магнітного потоку та впливу вихрових струмів в станині дозволяє кількісно оцінити рівень додаткових втрат у магнітній системі електричної машини.

Ключові слова: тяговий електропривод, модель, MatLab, Simulink, двигун постійного струму, потокозчеплення, обертовий момент, вихрові струми.

УДК 629.421:629.405

М. В. ХВОРОСТ, К. А. СОРОКА, Н. И. ШПИКА, А. И. БЕСАРАБ (ХНУГХ)

Кафедра электрического транспорта, Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, ул. Революции, 12, г. Харьков, 61002, тел.: (057) 707-32-73, эл. почта: dekanatzn@ksame.kharkov.ua

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С УЧЕТОМ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ

Рассмотрены вопросы моделирования тяговых двигателей при помощи пакета Simulink. Показана процедура перехода от математических уравнений, которые описывают модель, к имитационной модели в системе Matlab, что позволит построить любые характеристики еще на этапе разработки.

Предложены модели двигателей постоянного тока последовательного и смешанного возбуждения, особенною которых является учет реальных кривых намагничивания. Полученная модель тягового двигателя может быть использована для проведения оптимизации режимов работы тягового электропривода с энергосберегающей точки зрения, поскольку учитывает параметры, на которые может оказывать влияние система управления.

Разработанная модель двигателя постоянного тока смешанного возбуждения с учетом нелинейной зависимости магнитного потока и с учетом влияния вихревых токов в станине позволяет количественно оценить уровень дополнительных потерь в магнитной системе электрической машины.

Ключевые слова: тяговый электропривод, модель, MatLab, Simulink, двигатель постоянного тока, потокозчепление, вращающий момент, вихревые токи.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Саєнко Ю. Л.*

UDC 629.421:629.405

M. V. KHVOROST, K. O. SOROKA, N. V. SHPIKA, A. I. BESARAB (NUUEK)

Department of electrical transport, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Str. Revolution, 12, Kharkov, 61002, tel.: (057) 707-32-73, e-mail: dekanatzn@ksame.kharkov.ua

DEVELOPMENT THE MODELS OF ELECTRIC MACHINES FOR TRACTION ELECTRIC DRIVE OF THE TRANSPORT VEHICLES INCLUDING EDDY CURRENTS

Considered questions of modeling the traction motors by using Simulink. Showed the transition procedure from mathematical equations, which describe the model, to the imitation model in Matlab system, that will allow to build any characteristics only at the development stage.

Offered the models of DC electric machines with series field excitation and compound field excitation, the feature of which is account of real magnetization curves. Received model of electric motor can be use to carry out an optimization of the work modes of traction electric drive from the energy-saving point of view, because that model accounts a parameters on which a control system can influence.

Developed model of DC electric machines with compound field excitation with accounting a non-linear dependence magnetic flux and with column's eddy currents including allows to evaluate an auxiliary loses level in magnetic system of electric machine.

Keywords: traction electric drive, model, MatLab, Simulink, DC electric machine, magnetic flux linkage, torque, eddy current.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

© Хворост М. В. та ін., 2014

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЖТ), К. А. КАЛАШНИКОВ (ПРИДНЕПРОВСКАЯ Ж.Д.)

Кафедра Электроснабжение железных дорог, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени акад. В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел.: (056) 793-19-11, эл. почта: vkuz@i.ua

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ ПРИНЦИПОВ УМЕНЬШЕНИЯ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПУТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА

Введение

Украина относится к энергодефицитным странам, удовлетворяя свои потребности в топливно-энергетических ресурсах (ТЭР) за счет собственной их добычи менее чем на 50 % [1]. В связи с этим необходимо повышение энергоэффективности работы всех отраслей экономики и, в частности, железнодорожного транспорта [2, 3]. Поскольку энергетическая составляющая себестоимости перевозок составляет около 20 %, энергосбережение является одной из главных задач политики Укрзалізничці (УЗ). Руководством УЗ проводится большая работа по экономии ТЭР, успешно выполняются Программа повышения энергоэффективности и Программа уменьшения потребления энергоресурсов бюджетными организациями путем рационального использования в сферах транспорта на 2010-2014 гг. Одним из направлений энергосбережения на электрифицированных линиях является уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока, которые составляют около 7 % от величины потребления на тягу поездов.

Целью статьи является разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора оптимальной дислокации поездов между тяговыми подстанциями, оптимальной последовательности отправления и интервалов между поездами.

Анализ литературы

Уменьшение потерь электроэнергии в тяговой сети может быть достигнуто путем: применения систем тягового электроснабжения (СТЭ) повышенного напряжения, применения накопителей электроэнергии, управления режимами СТЭ на базе информационных технологий, усовершенствования методов учета и контроля потерь электроэнергии, разработки энергоэффективных графиков движения поездов (ГДП), регулирования транспортного потока [4].

В работе [5] установлена возможность регулирования показателей транспортного потока в

целях уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональных: последовательности отправления поездов, дислокации и интервалов между тяговыми нагрузками.

В настоящее время управление транспортным потоком осуществляется по графику движения, который не учитывает влияние показателей транспортного потока на энергетические характеристики СТЭ. В результате неравномерный характер движения поездов различного веса по расчетному ГДП приводит к повышению потерь электроэнергии в тяговой сети.

Основной материал

Решение задачи уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети состоит в поиске такого ГДП, при котором осуществляется пропуск заданных размеров движения с наименьшими энергозатратами. Суть задачи заключается в определении потерь электроэнергии в тяговой сети путем расчета схем для ряда моментов времени, в каждом из которых количество, конфигурация и величина нагрузки определяются ГДП.

Для выбора наиболее выгодного расположения тяговых нагрузок на ГДП по величине потерь электроэнергии в тяговой сети следует рассмотреть ряд реально возможных вариантов графиков при заданных категориях поездов. Варианты графиков рассматриваются между смежными ТП в пределах периода следования расчетного поезда. Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок представлен на рис. 1.

С помощью разработанных моделей СТЭ и транспортного потока на прикладном ПО были проведены многовариантные расчеты, которые показали, что при одном и том же транспортном потоке можно найти такое сочетание тяговых нагрузок, при которых потери мощности в тяговой сети будут минимальными.

Выбор рациональной последовательности отправления поездов различных категорий

Выполним моделирование пропуска 6 поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) для двухпутного участка постоянного тока Приднепровской железной дороги со следующими исходными данными:

- 1) расстояние между тяговыми подстанциями – 18 км;
- 2) токи, потребляемые поездами $I(L)$, $L \in L_H, L_K$;

- 3) скорости движения поездов $V(L)$, $L \in L_H, L_K$;
- 4) удельное сопротивление тяговой сети $r = 0,07$ Ом/км;

5) сечение проводов КС – 412 мм².
 Схема участка приведена на рис. 2.

Характеристики поездов представлены в табл. 1. При выполнении расчетов принято допущение, что режим напряжения для ЭПС каждого поезда в пакете не нарушается, задача ограничивается фиксированным временем пропуска заданного количества поездов по участку (1 час).

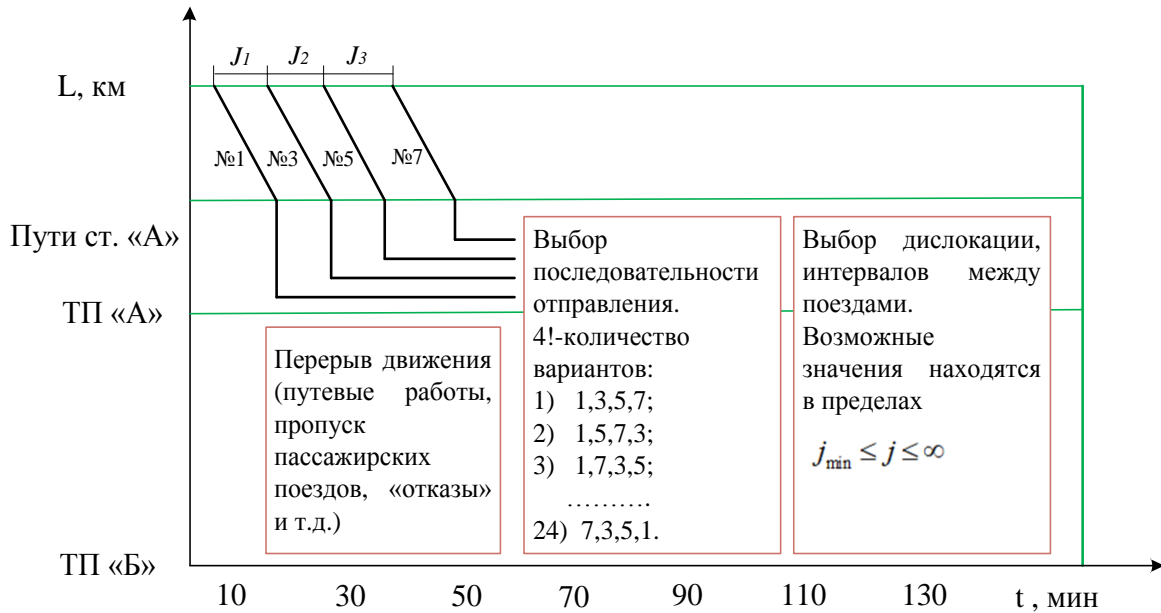


Рис. 1. Принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети путем выбора рациональной дислокации тяговых нагрузок

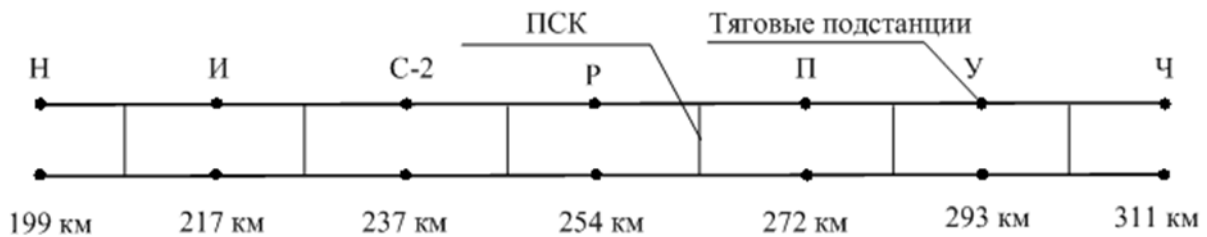


Рис. 2. Схема электрифицированного участка Приднепровской ж.д.

Таблица 1

Характеристики поездов различных категорий

№ категории поезда	Характеристики		
	Тип поезда	Масса	Серия электровоза
1	Грузовой	1 400	ВЛ-8
2	Грузовой	3 000	ДЭ-1
3	Грузовой	5 000	ВЛ-8

Определим потери электроэнергии в тяговой сети с учетом последовательности отправления

поездов 3 различных категорий (массой 1 400, 3 000 и 5 000 т) в четном и нечетном направлениях со средним интервалом между поездами равным 10 мин. Присвоим нечетным поездам № 1,3,5; четным № 2,4,6, причем 1-й категории соответствуют номера поездов № 1, № 2, 2-й категории – № 2, № 4, 3-й категории – № 3, № 6 (в условиях данной задачи количество перестановок соответствует 6!=720). Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Потери электроэнергии при различной последовательности отправления поездов

№ п/п	Последовательность отправления поездов	Потери электроэнергии при схеме питания контактной сети, тыс. кВт·ч		
		двухсторонней	узловой	параллельной
1	1,3,5,2,4,6	629,5	552,1	528,5
2	1,5,3,2,4,6	746,3	698,0	662,0
3	3,1,5,2,4,6	621,9	539,2	516,1

716	3,1,5,2,6,4	607,5	541,6	512,7
717	3,1,5,4,2,6	623,4	553,9	529,9

По результатам расчетов, представленных в табл.2, минимальные потери электроэнергии при различной последовательности отправления поездов: двухсторонняя схема – 607,5 тыс. кВт·ч (вариант № 716), узловая схема – 539,2 тыс. кВт·ч (вариант №3), параллельная схема – 512,7 тыс. кВт·ч (вариант № 716).

Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от последовательности отправления поездов различных категорий для различных схем питания составляют 20-23 % (двухсторонняя – 20 %, узловая и параллельная – 23 %).

Выбор рациональных интервалов между поездами

Выполним моделирование пропуска 6-ти поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного направления) и определим потери электроэнергии в тяговой сети с различными интервалами между поездами с учетом взаимного расположения поездов в четном и нечетном направлениях.

Формализуем задачу, введя обозначения на ГДП в общем виде (рис. 3).

Время пропуска пакета T в общем виде определяется выражением

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + t_4 - t_3 \quad (1)$$

где Δt_1 – задержка времени отправления первого поезда в пакете, мин;

J_1, J_2 – межпоездные интервалы, мин;

$t_4 - t_3$ – время хода последнего поезда в пакете, мин.

Учитывая принятое ограничение, получаем уравнение, определяющее независимые параметры ГДП,

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - t_4 - t_3 = \text{const} \quad (2)$$

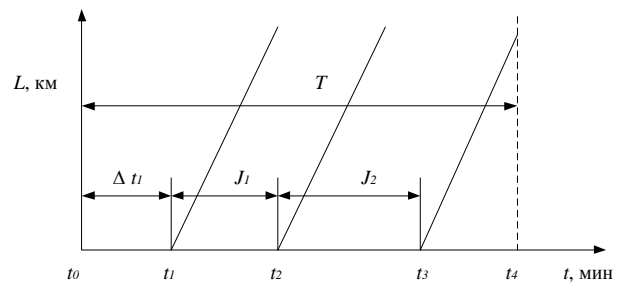


Рис. 3. Расчетная схема параметров графика движения поездов

Для обеспечения такого режима моделирования необходимо поддерживать постоянную сумму интервалов между поездами при их различных комбинациях (в условиях данной задачи количество вариантов соответствует $66! = 5,4434494 \cdot 10^{92}$). Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таким образом, на основе эвристического алгоритма определены рациональные интервалы между поездами при различных схемах питания.

Таблица 3

Потери электроэнергии для различных интервалов между поездами

№ п/п	Интервалы между поездами		Потери электроэнергии при схеме питания контактной сети		
	По 1-му пути	По 2-му пути	двухсторонней	узловой	параллельной
1	$J_1 = 10; J_2 = 20$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	626,4	582,7	518,1
2	$J_1 = 11; J_2 = 19$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	622,2	575,4	511,5
3	$J_1 = 12; J_2 = 18$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	618,2	568,3	505,1
4	$J_1 = 13; J_2 = 17$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	615,5	562,0	499,5
5	$J_1 = 14; J_2 = 16$	$J_1 = 10; J_2 = 10$	613,7	556,6	494,9

Для нечетных поездов: двухсторонняя схема – $J_1=16$; $J_2=14$, узловая и параллельная – $\Delta t=10$, $J_1=10$, $J_2=10$; для четных поездов: двухсторонняя схема – $J_1=14$; $J_2=16$, узловая – $J_1=18$; $J_2=12$, параллельная – $J_1=20$, $J_2=10$. При соблюдении данных интервалов потери электроэнергии в тяговой сети минимальные и составляют: двухсторонняя схема – 580,8 тыс. кВт·ч, узловая – 508,8 тыс. кВт·ч, параллельная – 480,6 тыс. кВт·ч. Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от интервалов между поездами и взаимного расположения поездов для различных схем питания составляет 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %).

Выбор рациональной дислокации тяговых нагрузок на участке Приднепровской железной дороги

Выполним моделирование пропуска 6 поездов (3 поезда четного и 3 поезда нечетного

направления) и определим потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации поездов между ТП. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таким образом, на основе метода деформируемого многогранника определены потери электроэнергии в тяговой сети с учетом дислокации тяговых нагрузок между ТП. Результаты расчета минимальных потерь электроэнергии с учетом дислокации тяговых нагрузок соответствуют значениям потерь электроэнергии с учетом интервалов между поездами: двухсторонняя схема – 580,8 тыс. кВт·ч, узловая – 508,8 тыс. кВт·ч, параллельная – 480,6 тыс. кВт·ч.

Пределы изменения величины потерь электроэнергии в зависимости от дислокации тяговых нагрузок для различных схем питания составляют 23–27 % (двухсторонняя – 23 %, узловая и параллельная – 27 %). ГДП, минимизирующие потери электроэнергии в тяговой сети представлены на рис. 4.

Таблица 4

Потери мощности с учетом дислокации поездов между ТП при двухсторонней схеме питания

Дислокация и оптимальные расстояния между поездами, км			Потери мощности в тяговой сети, кВт
Дислокация 1-го поезда x_1	Дислокация 2-го поезда x_2	Дислокация 3-го поезда x_3	
0,1	1,1	2,3	656,7
0,2	1,2	2,3	657,5
0,3	1,3	2,3	1 067,0
...
15,6	16,6	17,6	851
15,7	16,7	17,7	846

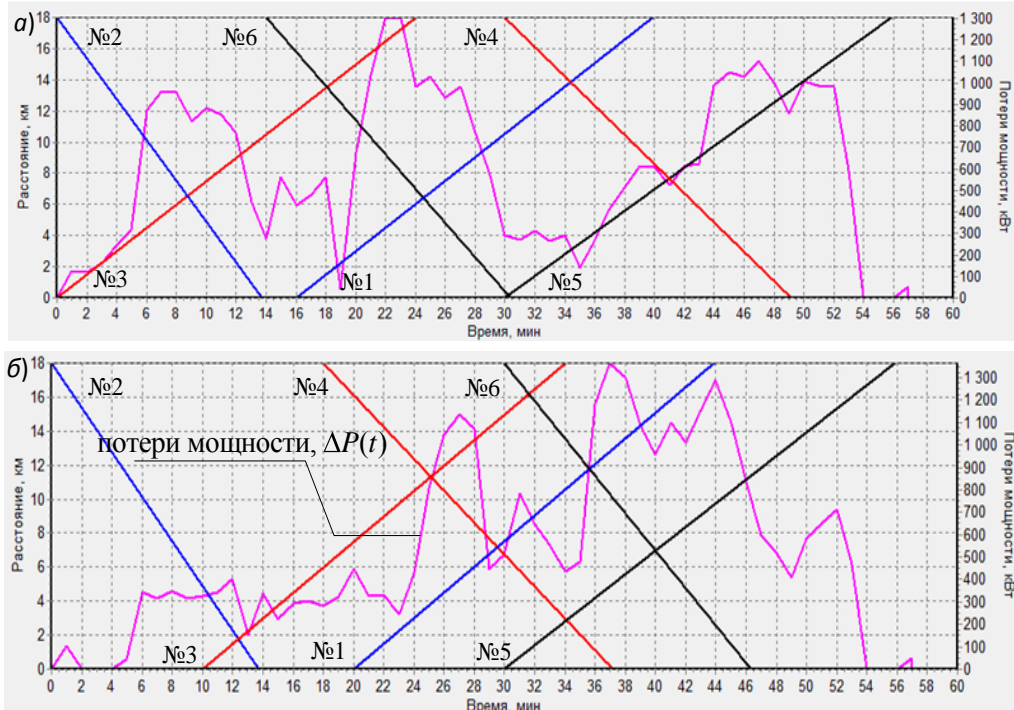


Рис. 4. ГДП, обеспечивающие минимум потерь электроэнергии, для двухсторонней (а) и узловой (б) схем питания

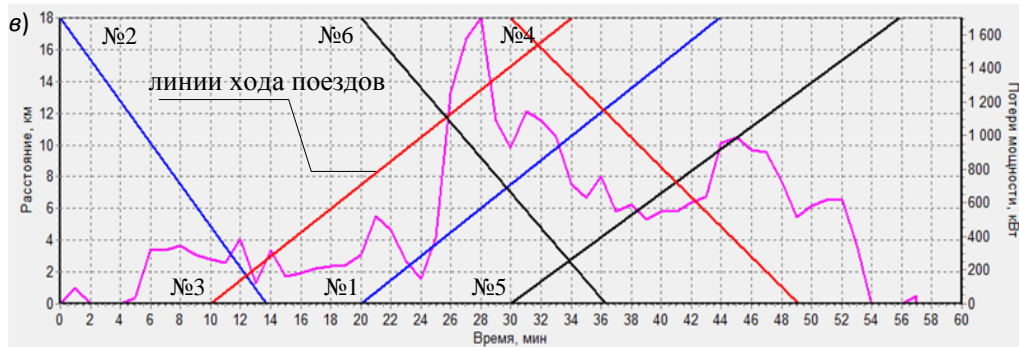


Рис. 4. ГДП, забезпечуючі мінімум втрат електроенергії, для паралельної схеми живлення (в)

Выводы

Таким образом, можно сформулировать научные принципы уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети:

1) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной дислокации поездов между ТП – на каждом шаге времени выбираем такую дислокацию поездов, при которой потери мощности в тяговой сети минимальны;

2) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальной последовательности отправления поездов – из возможных вариантов отправления поездов различных категорий необходимо выбрать такую последовательность, которой соответствует минимальное значение потерь электроэнергии в тяговой сети;

3) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальных интервалов между поездами – из множества возможных значений интервалов между поездами необходимо выбрать такие, при которых значение потерь электроэнергии в тяговой сети будет минимальным.

3) принцип уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети за счет выбора оптимальных интервалов между поездами – из множества возможных значений интервалов между поездами необходимо выбрать такие, при которых значение потерь электроэнергии в тяговой сети будет минимальным.

REFERENCES

1. Концепція Державної програми реформування залізничного транспорту України. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України № 651-р від 27 грудня 2006 р. – К. : Укрзалізниця, 2006 р.

1. Kontseptsiya Derzhavnoyi prohramy reformuvannya zaliznychnoho transportu Ukrainy. [The concept of the State Program of the railway reform of Ukraine]. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine № 651-r of December 27, 2006, Kiev, Ukrzaliznytsya, 2006.

2. Програма підвищення енергоефективності та Програма зменшення споживання енергоресурсів бюджетними установами шляхом їх раціонального використання у сферах транспорту та зв'язку на 2010 – 2014 роки / Міністерство транспорту України, Державна адміністрація залізничного транспорту України. – К., 2009. – 48 с.

2. Prohrama pidvyshchennya enerhoefektyvnosti ta Prohrama zmeshennya spozhyvannya enerhoresursiv byudzhethnymy ustanovamy shlyakhom yikh ratsional'noho vykorystannya u sferakh transportu ta zv'yazku na 2010 – 2014 roky [The program of energy efficiency and energy consumption reduction program in budget institutions by their management in the areas of transport and communications in 2010 – 2014] Ministerstvo transportu Ukrainy, Derzhavna administratsiya zaliznychnoho transportu Ukrainy, K., 2009, 48 p.

3. Стратегія розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. № 1555-р. – К.: КМУ, 2009.

3. Stratehiya rozvytku zaliznychnoho transportu na period do 2020 roku vid 16 hrudnya 2009 r. № 1555-r. [Strategy development of rail transport in the period to 2020. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine of December 16, 2009 p. № 1555-p.] Kiev, KМУ, 2009.

4. Кузнецов В. Г. Развитие теоретических основ энергозбереження в системах электропостачання тяги поїздів постійного струму : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.09 / В. Г. Кузнецов; [ДНУЗТ]. – Д., 2012. – 35 с.

4. Kuznetsov V. H. Rozvytok teoretynykh osnov enerhozberezhennya v systemakh elektropostachannya tyahy poyizdiv postynnoho strumu : avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.22.09 [Development of theoretical foundations of energy saving in DC power supply system: thesis Dr. Sc.: 05.22.09] D., 2012, 35 p.

5. Калашников К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / К. О. Калашников; [ДНУЗТ]. – Д., 2014. – 23 с.

5. Kalashnykov K. O. Zmeshennya vtrat elektroenerhiyi v tyahoviy merezhi postynnoho strumu shlyakhom vyboru ratsional'noyi dyslokatsiyi tyahovykh navantazhen': avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.09 [Reduction of energy losses in the DC traction lines by the rational deployment of traction loads] D., 2014, 23 p.

Поступила в печать 23.09.2014.

Ключевые слова: потери электроэнергии, контактная сеть, интервалы между поездами, последовательность отправления поездов, энергосбережение, тяговые подстанции, дислокация поездов.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

© Кузнецов В. Г., Калашников К. А., 2014

Україна належить до енергодефіцитних країн, яка задовольняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобутку менш ніж на 50%. Оскільки енергетична складова собівартості перевезень становить близько 20%, енергозбереження є однією з головних завдань політики Укрзалізниці. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі є одним з напрямків економії енергетичних ресурсів на електрифікованих ділянках. Метою статті є розробка наукових принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору оптимальної дислокації поїздів між тяговими підстанціями, оптимальної послідовності відправлення і інтервалів між поїздами. Методи: у статті використані метод деформованого багатогранника, евристичних алгоритмів, методи статистичної обробки експериментальних даних. Наукова новизна: запропоновано наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок вибору оптимального інтервалу на ділянці на основі методу деформованого багатогранника, за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення поїздів. Практична значимість: розроблені наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі можуть бути використані для планування енергозберігаючих заходів на ділянках електропостачання.

УДК 621.331

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЗТ), К. О. КАЛАШНИКОВ (ПРИДНІПРОВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ)

Кафедра Електропостачання залізниць, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені акад. В. Лазаряна, вул. Лазаряна 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел.: (056) 793-19-11, ел. пошта: vkuz@i.ua

РОЗРОБКА НАУКОВИХ ПРИНЦИПІВ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ШЛЯХОМ РЕГУЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

Україна належить до енергодефіцитних країн, яка задовольняє свої потреби в паливно-енергетичних ресурсах за рахунок власного їх видобутку менш ніж на 50%. Оскільки енергетична складова собівартості перевезень становить близько 20%, енергозбереження є однією з головних завдань політики Укрзалізниці. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі є одним з напрямків економії енергетичних ресурсів на електрифікованих ділянках. Метою статті є розробка наукових принципів зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі шляхом вибору оптимальної дислокації поїздів між тяговими підстанціями, оптимальної послідовності відправлення і інтервалів між поїздами. Методи: у статті використані метод деформованого багатогранника, евристичних алгоритмів, методи статистичної обробки експериментальних даних. Наукова новизна: запропоновано наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі за рахунок вибору оптимального інтервалу на ділянці на основі методу деформованого багатогранника, за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення поїздів. Практична значимість: розроблені наукові принципи зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі можуть бути використані для планування енергозберігаючих заходів на ділянках електропостачання.

Ключові слова: втрати електроенергії, контактна мережа, інтервали між поїздами, послідовність відправлення поїздів, енергозбереження, тягові підстанції, дислокація поїздів.

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 621.331

V. G. KUZNETSOV (DNURT), K. A. KALASHNIKOV (PRIDNEPROVSKA RAILWAY)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel.: (056) 793-19-11, e-mail: vkuz@i.ua

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC PRINCIPLES REDUCTION IN ENERGY LOSSES IN THE TRACTION DC NETWORK BY CONTROLLING TRAFFIC FLOWS

Introduction: Ukraine belongs to the energy deficient country that meets the needs for fuel and energy resources by own production at a level less than 50%. Since the energy component of the cost of transportation is about 20%, energy efficiency is one of the main policy objectives of Ukrzaliznitsa. Reduction of energy losses in traction lines is one of the main energy savings methods on electrified lines. The purpose of this paper is to develop scientific principles of reducing power losses in traction lines by selecting the optimal deployment of trains between traction substations, the optimal sequence of trains and the intervals between trains. Methods: we used the method of deformed polyhedron, heuristic algorithms, statistical treatment of experimental data. Scientific novelty: it's proposed the scientific principles for reduction of energy losses in traction lines by optimal deployment of trains in the area, due to the selection of the optimal interval at the site on the basis of the deformed polyhedron due to the choice of the optimal sequence of trains departure. Practical significance: The scientific principles of reducing energy losses in traction lines can be used for the planning of energy saving measures in power supply systems.

Keywords: power losses, the contact line, the intervals between trains, the sequence of departure of trains, energy, traction substations, the deployment of trains.

Internal reviewer *Kostin M O.*

External reviewer *Lezhnuk P. D.*

О. Ю. ПАПАХОВ, Н. О. ЛОГВІНОВА (ДНУЗТ)

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, 49010, м. Дніпропетровськ, Україна, вул. Лазаряна, 2, тел. +38(067)564-65-65, +38(067)524-43-22, ел. пошта: papahov0362@mail.ru, nata4ka8007@mail.ru

ОБГРУНТУВАННЯ РУХУ ПОЇЗДІВ НА НАПРЯМАХ ЗА ПОГОДЖЕНИМИ РОЗКЛАДАМИ

Постановка проблеми

Поставленою задачею є проведення дослідження виконання нормативного графіку руху вантажних поїздів на залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса, надання рекомендацій щодо скорочення строків доставки вантажів та визначення параметрів для переходу до графіку руху вантажних поїздів за частково погодженими розкладами на залізничному напрямку для здійснення перевезень з мінімальними для залізниці енергетичними витратами на тягу поїздів.

Під системою організації руху вантажних поїздів за погодженими розкладами розуміється щодобове відправлення протягом певного періоду часу постійної кількості складів поїздів на залізничних напрямках за фіксованими розкладами при економічно обгрунтованій нормі їх складу та маси з ув'язкою роботи поїзних локомотивів і локомотивних бригад та енергозабезпеченням перевізного процесу.

Приймаються безпосередньо заданими:

- початкові та кінцеві станції відправлення поїздопотоків залізничного напрямку (Ясинувата, Одеса-Сортувальна);

- станції передачі та злиття поїздопотоків по залізничному напрямку (Чаплине, Синельникове-1, Вільнянськ, Канцерівка, Апостолове, Кривий Ріг-Головний, Тимкове, Кропивне, Колосівка);

- обсяги поїздопотоків, які відправляються з початкових станцій і прибувають на кінцеві станції залізничного напрямку (Ясинувата, Одеса-Сортувальна) та зливаються з основним поїздопотоком;

- існуюча транспортна інфраструктура залізничного напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса;

Для вирішення поставленої задачі використовуються методи системного аналізу та математичної статистики.

Аналіз останніх досліджень

В проведених раніше дослідженнях [1-6] охарактеризований ряд проблем, пов'язаних з тради-

ційним розглядом показників використання вагонів та локомотивів, який характеризує окремі елементи перевізного процесу, нічого не кажуть о його підсумкових результатах. Останні оцінюються швидкістю доставки вантажів та рівнем виконання добових нормативів цієї швидкості.

Визначення невирішених раніше проблем

Оперування середніми значеннями тривалості елементів перевізного процесу не дозволяє знайти і оцінити практичні рекомендації прискорення доставки вантажів. Однак, в існуючій звітності немає даних конкретного технологічного аналізу вказаних елементів в їх взаємодії.

Досвід побудови сучасних аналітичних систем на базі інформаційних технологій доки недостатній, а використання графіків виконаного руху вельми трудомістко і може проводитися лише епізодично. Тим часом розкид досліджуваних значень не зрідка вельми великий.

Фактичні простоти вагонів на технічних станціях значно перевищують норми, які встановлені технологічними процесами, що виникає завдяки не погодженому підводу поїздів та локомотивів.

Мета та задачі

Метою дослідження є дослідження виконання нормативних графіків руху поїздів залізничного напрямку Ясинувата – Апостолове - Одеса для розробки технології організації руху вантажних поїздів за погодженими розкладами для підвищення якості транспортного обслуговування клієнтів, прискорення доставки вантажів, поліпшення показників використання рухомого складу та скорочення енергетичних витрат, пов'язаних з тяговим забезпеченням перевезень.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до організації перевізного процесу, в існуючий час, на залізницях України необхідно використовувати відправленні вантажних поїздів при наявності сформованого рухомого складу, поїзного локомотиву з локомотивною бригадою та наявністю вільної нитки графіка руху.

Фактичне відправлення поїздів з технічних станцій здійснюється без врахування цього

чинника по готовності складу поїздів, наявності локомотивів та локомотивних бригад без урахування існуючих ниток графіка руху не тільки зі станції відправлення, але й на наступних технічних станціях напрямку.

Математичне формулювання задачі

Юридичний час доставки вантажів ($T_{\text{юр}}$) розраховується згідно з Правилами перевезення вантажів.

Юридичний строк доставки вантажів на залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса для кожної залізниці розраховується за формулою

$$T_{\text{юр}} = 24 \left(\sum_{i=1}^I \left(\frac{L_{\text{тар},i}}{L_{\text{доб}}} \right) + 1 \right) \cdot \left(\frac{L_{\text{тар},i}}{\sum_{i=1}^I L_{\text{тар},i}} + T_{\text{п-к},i} \right), \quad (1)$$

де $L_{\text{тар},i}$ – тарифна відстань перевезення, км;

$L_{\text{доб}}$ – норма добового пробігу вагонів, км;

I – кількість залізниць, які приймають участь в перевезенні;

$T_{\text{п-к},i}$ – норма часу на виконання початково-кінцевих та додаткових операцій в межах даної залізниці.

Технологічний час доставки вантажів ($T_{\text{тех}}$) розраховується у відповідності з діючою нормативною організацією вантажного руху (порядок направлення вагонопотоків, план формування та графік руху поїздів).

Технологічний час доставки вантажів може бути більшим чи меншим юридичного часу по відношенню до кожної залізниці, так і в цілому по напрямку. Це пов'язано в основному з відхиленням вагонопотоків від тарифних маршрутів слідування та з нерівномірним розподіленням на протязі маршруту операцій переробки, поїздоутворення на технічних станціях.

Технологічний час доставки вантажів розраховується за формулою

$$T_{\text{тех}} = \sum_{j=1}^{K_{\text{рлб},i}} t_{\text{длб},ij} + \sum_{r=1}^{K_{\text{тр},i}} t_{\text{тр},ir} + \sum_{s=1}^{K_{\text{пер},i}} (t_{\text{пер},is} + t_{\text{нак},is}) + T_{\text{п-к},i}, \quad (2)$$

де $t_{\text{длб},ij}$, $t_{\text{тр},ir}$, $t_{\text{пер},is}$, $t_{\text{нак},is}$ – відповідний час слідування по ділянці роботи локомотивних

бригад j у межах залізниці i ; знаходження на технічній станції r без переробки; на технічній станції s з переробкою (за винятком часу накопичення); на станції s під накопиченням, год;

$K_{\text{рлб},i}$, $K_{\text{тр},i}$, $K_{\text{пер},i}$ – кількість відповідно ділянок роботи локомотивних бригад, станцій виконання технічних операцій без переробки та з переробкою, яку проходить вагон у межах залізниці i у відповідності з встановленою технологією перевізного процесу.

З позиції своєчасної доставки вантажів необхідно прагнути до технології перевезень, при якій $T_{\text{тех}} \geq T_{\text{юр}}$. Крім того, фактичний час доставки вантажів є випадковою величиною, розподілення якої описується нормальним чи усіченим нормальним законом [7]. Отже, навіть при дотриманні середніх технологічних норм простою на станціях при виконанні середньої графітової дільничної швидкості ймовірність виконання технологічного строку доставки (у випадку збігу математичного очікування $M[T_{\text{тех}}]$ та $M[T_{\text{юр}}]$) знаходиться за формулою

$$P(T_{\text{юр}} \leq T_{\text{тех}}) = 0,5. \quad (3)$$

В реальних оперативних обставинах вказана вірогідність може бути ще меншою.

Дослідження дільничної швидкості руху поїздів

За даними графіків виконаного руху поїздів за 2013 рік та перше півріччя 2014 року по напрямку залізничних перевезень Ясинувата – Апостолове – Одеса проведений аналіз технічної та дільничної швидкості руху поїздів в парному та непарному напрямках. Проведеними дослідженнями встановлено, що на одноколійних ділянках напрямку дільнична швидкість руху поїздів менша за технічну на 16 – 19 %, на одноколійних ділянках з двоколійними вставками складає 14 – 17 %, а на двоколійних ділянках – 3 – 7 %.

Особливу увагу необхідно звернути на рух поїздів між стиковими станціями суміжних залізниць де відхилення складає від 15 до 28 %. В той же час, існує залежність між парним вантажним напрямком перевезень, в якому відхилення складає від 22 до 28 % і непарним напрямком, відхилення в якому від 15 до 19 %.

В реальних умовах, фактична дільнична швидкість руху вантажних поїздів може змінюватися як в меншу, так і в бішу сторони чи дорівнювати показникам, закладеним в нормати-

вний графік руху поїздів на напрямку відповідно до маси поїзда брутто.

Основними причинами коливання фактичного значення дільничної швидкості руху вантажних поїздів є відправлення на ділянку не за нормативним графіком руху, що викликає зупинки поїздів під обгонами та схрещеннями та різниці у масі поїздів, що обумовлює невиконання перегінного часу ходу.

Дослідження фактичного часу ходу вантажних поїздів

Вихідні дані для дослідження фактичного часу ходу вантажних поїздів по напрямку залі-

зничних перевезень Ясинувата – Апостолове – Одеса отримані з маршрутів машиністів локомотивних депо та систем супутникової навігації локомотивів (довідки АСК ВП УЗ Є) за 2013 рік та 1 півріччя 2014 року.

Проведеними дослідженнями встановлено графічну залежність графікового та фактичного часу руху непарних та парних вантажних поїздів по міжстанційним перегонам залізничного напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса, які відповідно наведені на рис. 1 та 2.

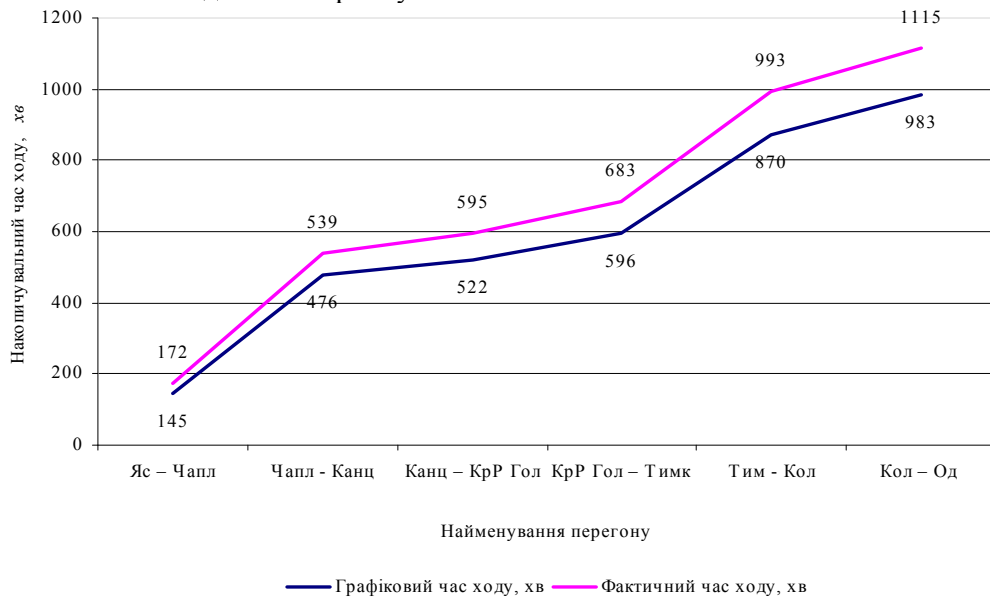


Рис. 1. Залежність графікового та фактичного часу руху непарних вантажних поїздів по міжстанційним перегонам

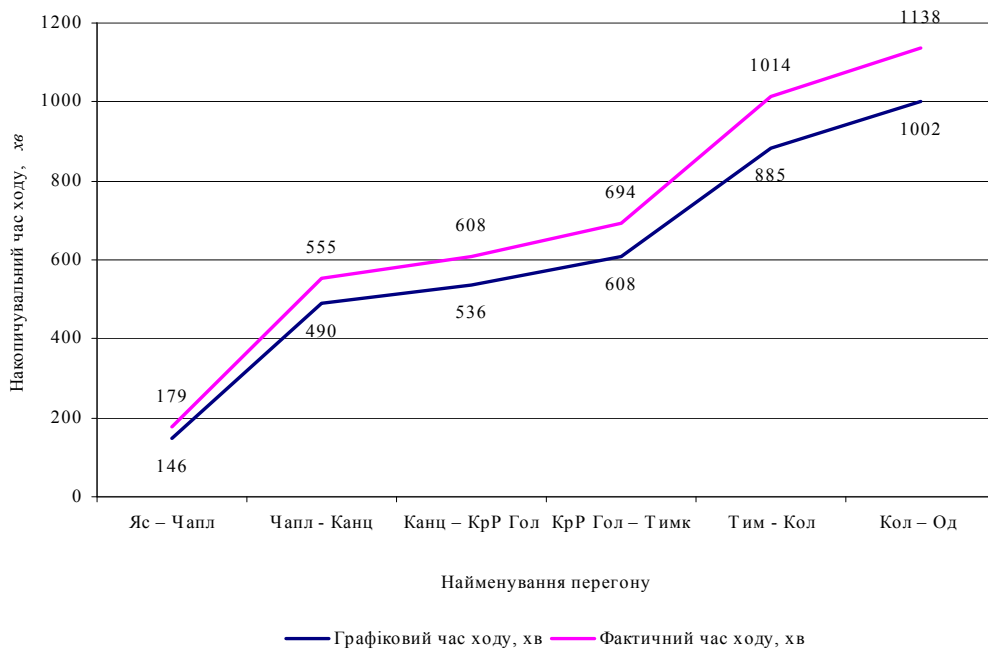


Рис. 2. Залежність графікового та фактичного часу руху парних вантажних поїздів по міжстанційним перегонам

В реальних умовах фактичний час доставки вантажів залізничним транспортом суттєво відрізняється від технологічного часу доставки (часу розрахованого у відповідності з діючими нормативами організації руху вантажних поїздів). В непарному напрямку математичне очікування фактичного часу ходу вантажних поїздів в порівнянні з графіковим на напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса складає 132 хв., в парному напрямку – 136 хв.

Фактичний час руху по відношенню до графікового на залізничному напрямку має коливання до 12 % по відношенню до математичного очікування.

Удосконалення організації процесів і технології перевезень в залізничній транспортній системі з метою прискорення доставки вантажів на основі системного підходу до вибору найважливіших параметрів та створення економіко-математичних моделей для їх оптимізації є першочерговою задачею залізничного транспорту.

Дослідження простою вагонів на технічних станціях напрямку

На технічних станціях транзитні вагони без переробки знаходяться у поїздах під технічним та комерційним доглядом, очікуванням поїзної локомотива та локомотивної бригади. Проведеними дослідженнями на технічних станціях залізничного напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса встановлено, що фактичний час обробки транзитного поїзда без переробки в порівнянні з технологічним часом збільшений на 120 – 385 %.

Фактичний час простою транзитних вагонопотоків з переробкою, з урахуванням часу накопичення, на залізничному напрямку більший за нормативний на 28 – 59 %.

Організація руху поїздів за погодженими розкладами

При будь-якій технології поїзної роботи для відправлення поїзда необхідна наявність чотирьох складових: склад поїзда, локомотив, локомотивна бригада та відповідна нитка графіка. В процесі здійснення взаємної ув'язки моментів готовності складу, локомотиву і локомотивної бригади для відправлення поїзда по вільній нитці графіка виникають непродуктивні простоя - очікування складом локомотиву, очікування локомотивом локомотивної бригади і ін.

При відправленні вантажних поїздів по готовності, часи готовності складу поїзда, локомотиву, локомотивної бригади, наявність вільної нитки графіка, ув'язки ниток графіка по на-

перед розташованим технічними станціям носять імовірнісний характер, який збільшує непродуктивні простоя. Фактичне відправлення поїздів ведеться без врахування можливостей їх раціонального пропуску по ділянках і прийому їх по наперед розташованим технічними станціями.

При такій технології в існуючих умовах оперативного планування поїзної роботи неможливо забезпечити своєчасне забезпечення складів поїздів локомотивами або локомотивними бригадами. Це наводить до того, що на станціях виникає відсутність або через мірне накопичення поїзних локомотивів або локомотивних бригад. Унаслідок цього зростають додаткові простоя готових складів в очікуванні відправлення. Крім того, в умовах, коли фактичне число поїздів досягає заявленого рівня лише в окрему добу, неминучі в одних випадках - тривале очікування локомотивними бригадами початку їх роботи по пункту приписки, а також відміни чергових поїздок, а в інших випадках - простоя складів поїздів через відсутність локомотивних бригад.

У випадку, якщо застосовується технологія руху вантажних поїздів за погодженими розкладами, склади поїздів заздалегідь готуються до відправлення за погодженою ниткою графіка, яка, не лише забезпечена локомотивом і локомотивною бригадою (на основі заданого на певний період графіку оберту локомотивів), але і погодженою по напрямку дотримання поїзда через декілька технічних станцій, що істотно зменшує непродуктивні втрати залізниці.

Закінчення формування кожного складу при цьому здійснюється так, щоб підготувати його до часу заданої нитки графіка, забезпеченої локомотивом і локомотивною бригадою. В цьому випадку при змінах інтенсивності вагонопотоків можливо використовують гнучкі норми маси і довжини поїздів (як знижені, так і підвищені відносно уніфікованих норм), які відправляються, при незмінній регулярності і ритму експлуатаційної роботи. Така технологія якнайповніше відповідає сучасним умовам перевезень і вимогам гарантованої доставки вантажів клієнтурі у встановлений термін.

В даний час необхідно передбачити перехідний період від відправлення вантажних поїздів по готовності до відправлення вантажних поїздів за погодженими розкладами. Це можна досягти за рахунок використання поєднаного графіка руху поїздів, який передбачатиме:

по-перше, варіантну кількість розкладів, при якому для обліку сезонних або місячних

коливань поїздопотоків передбачають різні варіанти розмірів руху без перекладки ліній ходу поїздів, тобто в одному графіку поєднують декілька варіантів графіка;

по-друге, варіантну спеціалізацію розкладів, при якій по одній нитці графіка в різну добу можуть слідувати поїзда різних призначень (зокрема, транзитні або розбірні, наскрізні поїзда або відправницькі маршрути);

по-третє, деякі погоджені нитки розкладів необхідно передавати клієнтам залізниці, які забезпечують постійні поїздопотоки в одних і тих же напрямках (металургійні комбінати).

Протягом року поєднаний графік руху поїздів може коректуватися залежно від потужності поїздопотоків: на осінньо-зимовий період; при введенні варіантних графіків при проведенні будівельно-монтажних і ремонтних робіт. У всіх останніх випадках, залежно від нерівномірності поїздопотоків, зміни повинні вноситися лише до технологічного графіка оберту локомотивів без зміни прокладки розкладів в поєднаний графік руху поїздів. Технологічний графік оберту локомотивів складається на планований період. Нитки графіку, які включені в погоджений графік оберту локомотивів, обслуговується локомотивними бригадами, які працюють по іменних розкладах та є календарним планом праці і відпочинку локомотивних бригад на майбутній період роботи.

Енергетична ефективність графіку руху поїздів за погодженими розкладами

Енергетична ефективність графіку руху поїздів за погодженими розкладами визначаються витратами електроенергії на переміщення поїздів та резервних локомотивів; на зупинки вантажних поїздів під обгонами та схрещуваннями за ворожістю маршрутів в станційних горловинах та на підходах до залізничних вузлів; на власні нужди локомотивів.

Витрати електроенергії на переміщення поїздів визначається ходовою швидкістю та масою поїзда брутто. Середня маса поїзда розраховується за формулою

$$Q_{бр} = \frac{n_{м.ср.} \cdot m \left(q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор}) \right)}{n_{пог} + n_{дис}}, \quad (4)$$

де $n_{м.ср.}$, $n_{пог}$, $n_{дис}$ – відповідно середня кількість поїздів на напрямку, кількість поїздів за погодженими розкладами та кількість диспетчерських локомотивів в залежності від непарності поїздопотоків;

m – кількість вагонів в складі поїзда, ваг.;

q_T – середня маса тари вагона, т;

$p_{нав}^{дин}$ – динамічне навантаження вантажного вагону, т;

$\alpha_{пор}$ – коефіцієнт порожнього пробігу.

Сумарні витрати електроенергії на ділянці за добу розраховуються за формулою

$$A_{ел} = 2 \cdot 10^{-4} L_{нав} n_{м.ср.} m \left(q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор}) \right) \times \left(e_{п} + e_{зуп} + e_{сл} \right) \lambda + N_{рез} L_{нав} e_{ел.рез.}, \quad (5)$$

де $L_{нав}$ – довжина напрямку перевезень, км;

$e_{п}$, $e_{зуп}$, $e_{сл}$ – питомі (на 1000 тонно-км брутто вагонних) витрати електроенергії відповідно на переміщення поїздів, на розгін поїздів після зупинок та на власні нужди електровозів, кВт-год.;

λ – коефіцієнт обліку «умовних» втрат електроенергії в контактній мережі та на тягових підстанціях;

$e_{ел.рез.}$ – питомі (на 1 км. одиночного руху) витрати електроенергії на переміщення локомотива резервом, кВт-год.

Загальні питомі (на 10000 тонно-км брутто вагонних) витрат електроенергії розраховуються за формулою

$$a_{ел} = \frac{10000 A_{ел}}{2 L_{нав} n_{м.ср.} m \left(q_T + p_{нав}^{дин} (1 - \alpha_{пор}) \right)}. \quad (6)$$

Практично усі питомі витрати ($e_{п}$, $e_{зуп}$, $e_{сл}$) у тій або іншій мірі збільшуються зі зменшенням $Q_{бр}$. При цьому $e_{зуп}$ зменшується зі зменшенням кількості зупинок, а $e_{сл}$ зменшується зі зменшенням коефіцієнта потреби локомотивів на одну пару поїздів.

Висновки

Технологія поїзної роботи на базі відправлення і пропуску вантажних поїздів за погодженими розкладами має бути включена в роботу автоматизованих центрів управління перевезеннями всіх рівнів. Нові інформаційні технології дозволяють оптимізувати побудову графіка руху вантажних поїздів, підвищити його надійність, проводити оперативне планування поїзної і вантажної роботи, гарантуючу ефективний рух поїздів за встановленими розкладами в ув'язці із заявками вантажовідправників на перевезення, а також технологічний моніторинг підготовки,

відправлення, просування поїздів за розкладами та аналіз поїзної роботи з розрахунком раціональних розмірів руху і точок відправлення вантажних поїздів за розкладом.

Запропонована система не може бути реалізована без вирішення двох основних питань. По-перше, необхідний механізм постійної підтримки руху поїздів за розкладами. По-друге, потрібно забезпечити надійну роботу технічних засобів та технічних станцій. Що стосується першого питання, то для його вирішення необхідний постійний контроль виконання графіка руху поїздів. У випадках його порушень повинні прийматися адекватні дії з відновлення графіка руху поїздів.

В умовах організації руху вантажних поїздів за розкладами варіантна спеціалізація ниток графіка повинна враховувати організацію постановки вантажних поїздів у рейс і розподіли

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бородин А.Ф. Улучшать использование грузовых локомотивов [Текст] / А.Ф. Бородин, В.Н. Костик // Железнодорожный транспорт – 1994. – № 8. – С. 16–19.
2. Куценко Н.Н. Новое в организации вагонопотоков [Текст] / Н.Н. Куценко, А.Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт – 1997. – № 1. – С. 20–22.
3. Бородин А.Ф. Транспортное обслуживание и организация вагонопотоков [Текст] / А.Ф. Бородин // Вестник ВНИИЖТ - 1997, - №5. – С. 36–39.
4. Некрасевич В. И. Каким быть графику грузового движения [Текст] / В.И. Некрасевич, А.Ф. Бородин // Железнодорожный транспорт – 1992. – № 12. – С. 2–8.
5. Бородин А.Ф. Улучшение использования путевого развития сортировочных станций [Текст] / А.Ф. Бородин, М.Ф. Васин – М.: Транспорт, 1992. – 48 с.
6. Дронов В.А. Рациональная эксплуатация локомотивов [Текст] / В.А. Дронов, А.Ф. Бородин, В.Н. Ковалев // Железнодорожный транспорт – 1996. – № 9. – С. 15–19.
7. Шаров В.А. Технологическое обеспечение своевременности доставки грузов [Текст] / В.А. Шаров // Вестник ВНИИЖТ, 1994. - №3. – С. 37–43.

Надійшла до друку 04.10.2014.

Внутрішній рецензент *Кузнецов В. Г.*

Зовнішній рецензент *Лежнюк П. Д.*

Велике значення для вдосконалення перевізного процесу на залізничному транспорті має злагодженість в роботі всіх його підрозділів, які забезпечують організацію руху поїздів за графіком. Графік руху визначає план роботи всіх підрозділів залізничного транспорту, пов'язаних з рухом поїздів, до яких відносяться: експлуатаційна робота, тягове забезпечення локомотивами та локомотивними бригадами, оглядачів вагонів, при надійності роботи інфраструктури залізничного напрямку та пристроїв СЦБ, енергозабезпечення ділянок, довжини гарантованих ділянок слідування вагонів та локомотивів між технічними станціями.

Метою дослідження технології організації руху вантажних поїздів за погодженими розкладами є підвищення якості транспортного обслуговування клієнтів, прискорення доставки вантажів, поліпшення показників використання рухомого складу. Основною задачею дослідження є аналіз фактичного графіку руху вантажних поїздів на залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса, його відхилення від нормативного та вплив на показники використання рухомого складу залізниць. Об'єктом дослідження є процес пропуску поїздів на залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса за погодженими розкладами графіку руху поїздів. Предметом дослідження є параметри графіка руху поїздів.

Методичною основою виконання комплексних досліджень є: аналіз та узагальнення літературних джерел і позитивного досвіду пропуску вантажних поїздів по залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса; методи статистичної, вартісної, аналітичної та експертної оцінки даних щодо стану пропуску вантажних поїздів по напрямку в оперативних умовах.

Результатами дослідження є: аналіз даних відхилення в оперативних умовах фактичного часу руху поїздів на залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса від нормативних значень та виявлення факторів, які створили це відхилення. Науковою новизною дослідження є системний підхід у визначенні використання графіка руху вантажних поїздів на залізничному напрямку Ясинувата – Апостолове – Одеса.

Проведений аналіз виконання графіків руху поїздів на залізничному напрямку дозволяє провести оцінку фактичного відхилення часу руху поїздів у нормативному графіку та закласти ці показники при розробці графіка руху поїздів за погодженими розкладами.

Ключові слова: показники, графік руху, поїзд, маса, парк локомотивів.

УДК 656.222

А. Ю. ПАПАХОВ, Н. А. ЛОГВІНОВА (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна, 49010, г. Днепропетровск, Украина, ул. Лазаряна, 2, тел.: +38(067)564-65-65, +38(067)524-43-22, эл. почта: papahov0362@mail.ru, nata4ka8007@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ Поездов на направлениях по СОГЛАСОВАННЫМ РАСПИСАНИЯМ

Большое значение для усовершенствования перевозочного процесса на железнодорожном транспорте имеет налаженность в работе всех его подразделений, которые обеспечивают организацию движения поездов по графику. График движения определяет план работы всех подразделений железнодорожного транспорта, связанных с движением поездов, к которым относятся: эксплуатационная работа, тяговое обеспечение локомотивами и локомотивными бригадами, осмотрщиков вагонов, при надежности работы инфраструктуры железнодорожного направления и устройств СЦБ, энергообеспечение участков, длины гарантированных участков следования вагонов и локомотивов между техническими станциями.

Целью исследования технологии организации движения грузовых поездов по согласованным расписаниям является повышение качества транспортного обслуживания клиентов, ускорение доставки грузов, улучшение показателей использования подвижного состава. Основной задачей исследования является анализ фактического графика движения грузовых поездов на железнодорожном направлении Ясиноватая – Апостолово – Одесса, его отклонение от нормативного и влияние на показатели использования подвижного состава железной дороги. Объектом исследования является процесс пропуска поездов на железнодорожном направлении Ясиноватая – Апостолово – Одесса по согласованным расписаниям графика движения поездов. Предметом исследования являются параметры графика движения поездов.

Методической основой выполнения комплексных исследований является: анализ и обобщение литературных источников и позитивного опыта пропуска грузовых поездов по железнодорожному направлению Ясиноватая – Апостолово – Одесса; методы статистической, стоимостной, аналитической и экспертной оценки данных относительно состояния пропуска грузовых поездов по направлению в оперативных условиях.

Результатами исследования является: анализ данных отклонения в оперативных условиях фактического времени движения поездов на железнодорожном направлении Ясиноватая – Апостолово – Одесса от нормативных значений и выявления факторов, которые создали это отклонение. Научной новизной исследования является системный подход в определении использования графика движения грузовых поездов на железнодорожном направлении Ясиноватая – Апостолово – Одесса.

Проведенный анализ выполнения графиков движения поездов на железнодорожном направлении позволяет провести оценку фактического отклонения времени движения поездов в нормативном графике и заложить эти показатели при разработке графика движения поездов по согласованным расписаниям.

Ключевые слова: показатель, графика движения, поезд, масса, парк локомотивов.

Внутренний рецензент *Кузнецов В. Г.*

Внешний рецензент *Лежнюк П. Д.*

UDC 656.222

O. Y. PAPAHOV, N. O. LOGVINOVA (DNURT)

Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, 49010, Dnipropetrovsk, Ukraine, Lazaryana 2 Str., tel.: +38(067)564-65-65, +38(067)524-43-22, e-mail: papahov0362@mail.ru, nata4ka8007@mail.ru

RATIONALE TRAINS ON THE DIRECTION ON THE AGREED SCHEDULE

Great importance for the improvement of the transportation process in railway transport has established in all its divisions, which provide the organization of trains on schedule. Timetable establish a work plan all of rail transportation, involving the movement of trains, which include: maintenance work, providing traction locomotives and locomotive crews, osmotrschikov cars, with the reliability of the infrastructure of railway lines and signaling systems, power supply sections, the length of the guaranteed portions of following cars and locomotives between technical stations.

The purpose of research of technology of organization of motion of freight trains on the concerted time-tables is upgrading of a transport service of customers, acceleration of delivery of loads, improvement of indexes of the use of mobile composition. The basic task of research is an analysis of actual chart of motion of freight trains on railway direction of Yasinovataya – Apostolovo is Odessa, his deviation from normative and influence on the indexes of the use of mobile composition of railway. A research object is a process of admission of trains on railway direction of Yasinovataya – Apostolovo is Odessa on the concerted curricula of train table.

Methodical basis of implementation of complex researches is: analysis and generalization of literary sources and positive experience of admission of freight trains to railway direction of Yasinovataya – Apostolovo is Odessa; methods of statistical, cost, analytical and expert estimation of information in relation to the state of admission of freight trains to direction in operative terms.

Research results is: analysis of data of rejection in the operative terms of actual time of motion of trains on railway direction of Yasinovataya – Apostolovo is Odessa from normative values and exposure of factors which created this rejection. The scientific novelty of research is approach of the systems in determination of the use of chart of motion of freight trains on railway direction of Yasinovataya – Apostolovo is Odessa.

The conducted analysis of implementation of train tables on railway direction allows to conduct the estimation of actual rejection of time of motion of trains in a normative chart and pawn these indexes at development of train table on the concerted time-tables.

Keywords: index, timetable, train, mass, park of locomotives.

Internal reviewer *Kuznetsov V. G.*

External reviewer *Lezhnuk P. D.*

УДК 621.331:621.311.4

В. Г. СИЧЕНКО, О. О. МАТУСЕВИЧ, А. О. КИРИЧЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056)793 19 17, ел. пошта: al_m0452@meta.ua

ПРОЦЕСНИЙ ІНЖИНІРИНГ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

Вступ

Здійснення якісного та безперебійного електропостачання залізниць в значній мірі визначається надійністю функціонування обладнання ТП. У свою чергу, надійність обладнання ТП залежить від ефективності та якості системи діагностики та ТО і Р. Електротехнічне устаткування ТП має високі розрахункові показники надійності, але в процесі експлуатації під впливом різних чинників, зміни режимів роботи стан обладнання ТП безперервно погіршується, внаслідок чого знижується експлуатаційна надійність і збільшується небезпека виникнення відмов.

Згідно проведеного аналізу роботи господарства електрифікації та електропостачання за останні роки можна зробити висновок, що значна частина електротехнічного обладнання ТП електрифікованих залізниць вже вичерпала свій ресурс і потребує поетапної модернізації, оновлення або заміни.[1] Крім того, існуюча система ТО і Р ТП, в основу якої покладено планово-попереджувальні роботи (ППР), у нових економічних умовах експлуатації залізниць не забезпечує у багатьох випадках ухвалення та прийняття ефективних рішень. В таких умовах необхідно підвищувати ефективність використання існуючого обладнання, застосовувати нові методи діагностування, ТО і Р обладнання [2, 3].

Тож проблема забезпечення надійності функціонування обладнання ТП та зниження аварійності в процесі експлуатації стає першочерговим завданням системи електропостачання електрифікованих залізниць.

Мета

Метою даної статті є аналіз існуючих систем ТО і Р та дослідження стратегій експлуатації силового обладнання тягових підстанцій електрифікованих залізниць. Пошук нових сучасних методів удосконалення системи діагностування, ТО і Р в процесі експлуатації ТП, що відповідають передовим вимогам до керування якістю (ДСТУ ISO 9001:2009). Підвищення надійності функціонування силового обладнання ТП та зниження його аварійності для забезпе-

чення якісного і безперебійного електропостачання залізниць.

Методика

Теоретичною базою дослідження стали публікації, які присвячені дослідженню досвіду з питань якісного вирішення проблем діагностики, ТО і Р електрообладнання ТП та надійного електропостачання залізниць.

В технологічному процесі технічного обслуговування ТП однією із складних задач є кількісна оцінка ефективності використання великих технічних систем на залізничному транспорті. У цьому напрямку розглянемо процес ТО і Р силових трансформаторів ТП, які мають велике значення у забезпеченні надійної роботи системи тягового електропостачання залізниць.

В даний час застосовуються теоретично обґрунтовані методи організації процесів ТО і Р силових трансформаторів, однак у своїй більшості вони не дозволяють враховувати комплексний вплив на параметри системи ТО і Р умов експлуатації трансформаторів, числа відмов, складу та числа обслуговуючих бригад, кількісного і якісного складу запасних частин та помилок обслуговуючого персоналу, тощо.

В дійсних умовах експлуатації деталі та вузли трансформатора зношуються, старіють, і взагалі, зменшується ресурс трансформатора. Тому при вирішенні питань раціональної організації ТО і Р трансформаторів повинні враховуватися всі можливі фактори зниження експлуатаційної надійності.

Перспективними методами вирішення зазначених проблем є обслуговування за фактичним технічним станом силового електрообладнання ТП, процесний інжиніринг до управління системою ТО і Р електрообладнання ТП за обраною цільовою функцією. Так, в якості цільової функції можуть бути технічні, соціально-інженерні (число і склад обслуговуючих бригад) та економічні (мінімізація витрат) показники або показники експлуатаційної надійності.

Цільова функція завжди оптимізується за технічними, економічними, соціальними крите-

ріями або критерієм надійності чи мати будь-яку іншу форму оцінки [4]. Найбільш повно вимогам процесного інжинірингу задовольняють комплексні показники надійності у вигляді цільових функціоналів готовності $K_2(t)$ і технічного використання $K_{mv}(t)$.

Згідно ГОСТ 27.002-89 [5] коефіцієнт готовності характеризує ймовірність того, що об'єкт опиниться у працездатному стані у довільний момент часу, крім планових періодів, впродовж яких використання об'єкта за призначення не передбачається:

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^m T_{vi}}, \quad (1)$$

де T_i - час збереження працездатності в i -му циклі функціонування об'єкта;

T_{vi} - час відновлення(ремонт) після i -тої відмови об'єкта;

n - число робочих циклів за розглянутий період експлуатації;

m - число відмов (відновлень) за розглянутий період.

Коефіцієнт технічного використання представляє собою відношення математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані за деякий період експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані і простоїв, обумовлених технічним обслуговуванням і ремонтом за той же період експлуатації.

$$K_{mv} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n T_i + \sum_{i=1}^m T_{vi} + \sum_{j=1}^n T_{nlj}}, \quad (2)$$

де T_{nlj} - довготривалість виконання планового j -того ремонту, що потребує виводу об'єкта із працездатного стану;

k - число профілактик, що потребують відключення об'єкта за розглянутий період.

Отже, K_{mv} відрізняється від K_2 тим, що при його визначенні враховується весь час вимушених простоїв, тоді як при визначенні K_2 час простою, пов'язаний з проведенням профілактичних робіт, не враховується.

Сумарний час вимушеного простою об'єкта зазвичай включає час:

- на пошук і усунення відмови;
- на регулювання і налаштування об'єкту після усунення відмови;
- для простою через відсутність запасних частин;
- для профілактичних робіт.

В умовах експлуатації на рівень надійності об'єктів ТП значний вплив має система ТО і Р та якість і ефективність проведення робіт [6].

Розглянемо роботу одного з силових трансформаторів ТДТН-25000/150-70 У1 ТП постійного струму (ЕЧЕ-15) за період експлуатації з 2007 по 2013 рік. За даний період експлуатації проводилося шість поточних ремонтів, були відмови в роботі та проводилось ТО і міжремонтні випробування згідно з: «Інструкцією з технічного обслуговування тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць» ЦЕ-0024; «Технологічних карт поточного ремонту обладнання тягових підстанцій залізниць» ЦЕ-0040; «Типових норм часу на поточний ремонт обладнання та пристроїв тягових підстанцій електрифікованих залізниць» [1, 7- 9].

В реальних умовах експлуатації нормогодини на виконання планових ремонтів збільшуються на деякий коефіцієнт (K_n), що пов'язано з неякісним плануванням робіт, відсутністю необхідних інструментів та пристроїв діагностування, запасних частин, недостатнього рівня професійної підготовки та виробничого досвіду персоналу, тощо.

Тривалість виконання поточного ремонту та міжремонтних випробувань згідно з [9] представлена в табл. 1.

Розрахунок комплексних показників експлуатаційної надійності проведемо за формулами (1), (2) для двох випадків: з урахуванням поправочного коефіцієнту $K_n=1,3$ на час виконання планових ремонтів та за нормативним часом виконання планових ремонтних робіт. Поточні ремонти трансформатора проводилися один раз на рік в липні місяці, а періодичні огляди кожен місяць.

Також, враховуючи накопичений світовий досвід застосування ТО і Р за фактичним технічним станом дозволяє дати наступну узагальнену оцінку ефективності цього методу: зниження витрат на обслуговування до 75 %, зниження кількості обслуговувань до 50 %, зниження числа відмов до 70 % за перший рік роботи [10, 11].

З врахуванням цього досвіду, при розрахунках коефіцієнтів готовності і технічного вико-

ристання, припустимо що кількість профілактичних обслуговувань і ремонтів (ПОР) можна зменшити від 25% до 50%. У даному випадку,

скорочення загального часу профілактичних обслуговувань і ремонтів, обумовлене використанням нових підходів до організації ТО і Р та діагностування: процесний інжиніринг управління системою ТО і Р електрообладнання ТП, визначення дійсних параметрів та обслуговування за фактичним технічним станом, тощо.

Вхідні дані для розрахунків з урахуванням поправочного коефіцієнту на час виконання

ремонтних робіт та припущень занесені у табл. 2, а з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт та припущень – у табл. 3.

Для прикладу розрахуємо коефіцієнти готовності і технічного використання та побудуємо графіки цих коефіцієнтів за реальних умов експлуатації з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт. Графіки цих коефіцієнтів представлені на рис. 1, 2.

Таблиця 1

Типові норми часу на поточний ремонт, міжремонтні випробування силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 та середній час відновлення після відмови

Типові норми часу	Нормо-години (згідно НТД)	Нормо-діб (згідно НТД)	Нормо-години (фактично) $K_n \approx 1,3$	Нормо-діб (фактично) $K_n \approx 1,3$
Поточний ремонт трансформатора	6,68	0,278	8,684	0,362
Міжремонтні випробування	7,476	0,312	9,718	0,404
Середній час відновлення після відмови	100	4,166	130	5,416
Середній час виконання 1-го періодичного огляду	0,57 нормо-години або 0,024 нормо-доби			

Таблиця 2

Вихідні дані для розрахунку при $K_n = 1,3$

Показник	За нормою при $K_n = 1,3$	При 25% зменшення ПОР	При 50% зменшення ПОР
Число робочих циклів n	8	8	8
Число відмов m	1	1	1
Число профілактик k	7	5	3
Час відновлення T_{θ} , нормо-діб	5,416	5,416	5,416
Час виконання планового ремонту (враховано час на ПР і міжремонтні випробування) $T_{пл}$, нормо-діб	2,576	1,852	1,49
Середній час виконання періодичних оглядів (за шість років експлуатації було 72 огляди, при зменшенні ПОР на 25% було 54 огляди а при зменшенні на 50% - 36) $T_{мо}$, нормо-діб	1,728	1,296	0,864

Таблиця 3

Вихідні дані для розрахунку з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт

Показник	За нормою	При 25% зменшення ПОР	При 50% зменшення ПОР
Число робочих циклів n	8	8	8
Число відмов m	1	1	1
Число профілактик k	7	5	3
Час відновлення T_{θ} , нормо-діб	4,166	4,166	4,166
Час виконання планового ремонту (враховано час на ПР і міжремонтні випробування) $T_{пл}$, нормо-діб	1,979	1,424	1,146
Середній час виконання періодичних оглядів (за шість років експлуатації було 72 огляди, при зменшенні ПОР на 25% було 54 огляди а при зменшенні на 50% - 36) $T_{мо}$, нормо-діб	1,728	1,296	0,864

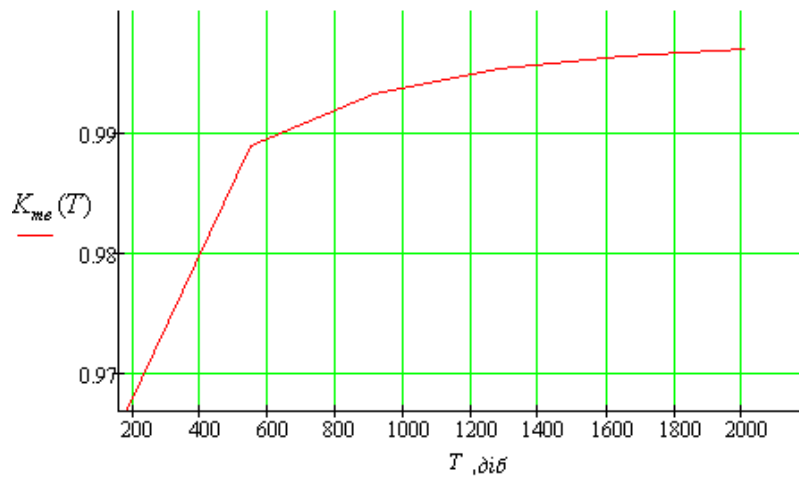


Рис. 1. Графік $K_{me}(T)$ за реальних умов експлуатації з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт

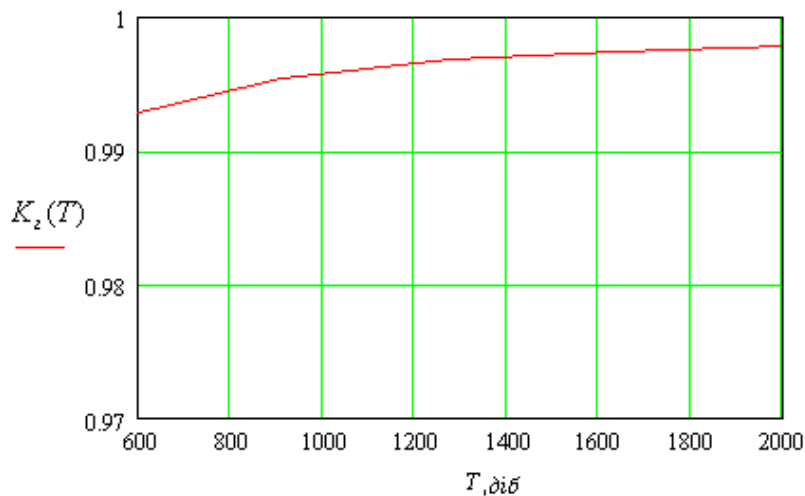


Рис. 2. Графік $K_2(T)$ за реальних умов експлуатації з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт

Результати розрахунків $K_2(T)$ та $K_{me}(T)$ згідно вхідних даних які відображені у табл. 2 та 3, зведемо у табл. 4.

Згідно даних табл. 4 побудуємо суміщенні графіки коефіцієнтів готовності і технічного використання силового трансформатора для вище зазначених двох випадків з урахуванням зменшення загального часу на профілактичні роботи (ПР) на 25 і 50%.

Графіки коефіцієнтів готовності і технічного використання наведені на рис. 3-6.

Проведемо розрахунок витрат на ТО і Р силового трансформатора ТДТН-25000/150-70 У1 згідно даних про кількість і вартість матеріалу (табл. 5), який застосовується при ТО і Р трансформаторів та окладів електромеханіків і погодинних тарифних ставок електромонтерів (табл. 6).

Всі дані про кількість і вартість матеріалу усереднені, бо кількість матеріалу, яка необхідна для проведення ремонтів трансформаторів,

залежить від потужності трансформатора і довготривалості його експлуатації (так, наприклад при поточному ремонті трансформатора кількість масла, яку доливають, може коливатися в досить великих межах, тому визначити точну кількість дуже складно).

Оплата праці електромеханіка за 1 годину становитиме 19,57 грн/год з урахуванням того, що за місяць він в середньому відпрацьовує 168 год.

При розрахунку оплати праці обслуговуючого персоналу ТП будемо враховувати, що до окладу або погодинної тарифної ставки додається 8% за шкідливі умови праці, отже:

- оплата праці електромеханіка 2 гр. становитиме $C_1 = 21,14$ грн/год;
- оплата праці електромонтера 3 розряду становитиме $C_2 = 12,68$ грн/год;
- оплата праці електромонтера 4 розряду становитиме $C_3 = 14,22$ грн/год.

Коефіцієнти готовності та технічного використання з урахуванням поправочного коефіцієнту на час виконання ремонтних робіт та з нормативним часом

Коефіцієнт	При $K_n = 1,3$ (фактично)	За нормою (згідно НТД)
$K_{тв}$	0,996	0,997
$K_{тв}$ при зменшенні ПОР на 25%	0,997	0,998
$K_{тв}$ при зменшенні ПОР на 50%	0,998	0,998
K_2	0,997	0,998
K_2 при зменшенні ПОР на 25 %	0,998	0,998
K_2 при зменшенні ПОР на 50 %	0,999	0,999

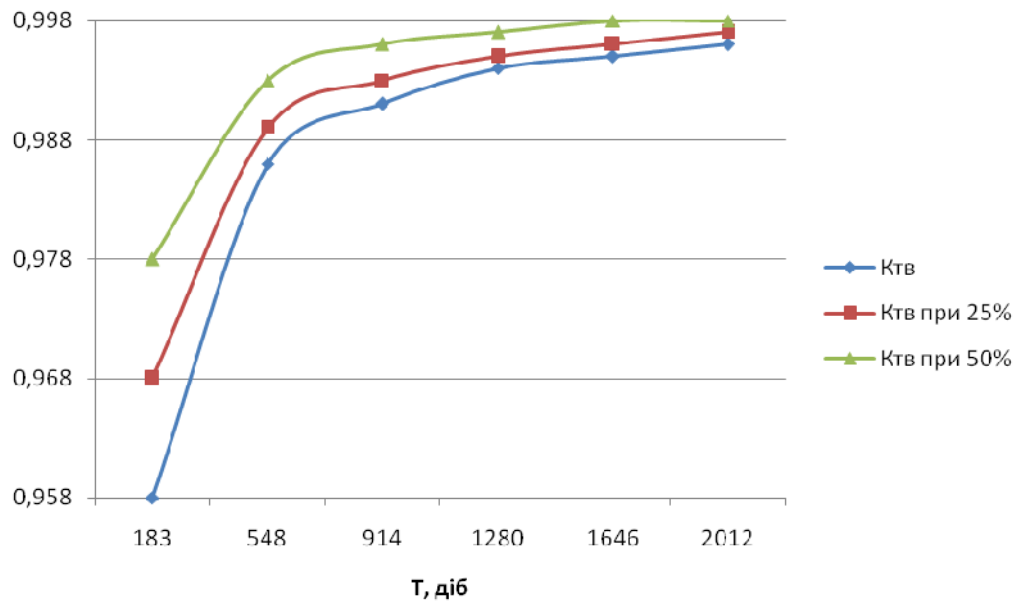


Рис. 3. Графік коефіцієнта технічного використання силового трансформатора з урахуванням поправочного коефіцієнта $K_n = 1,3$ на час виконання ремонтних робіт

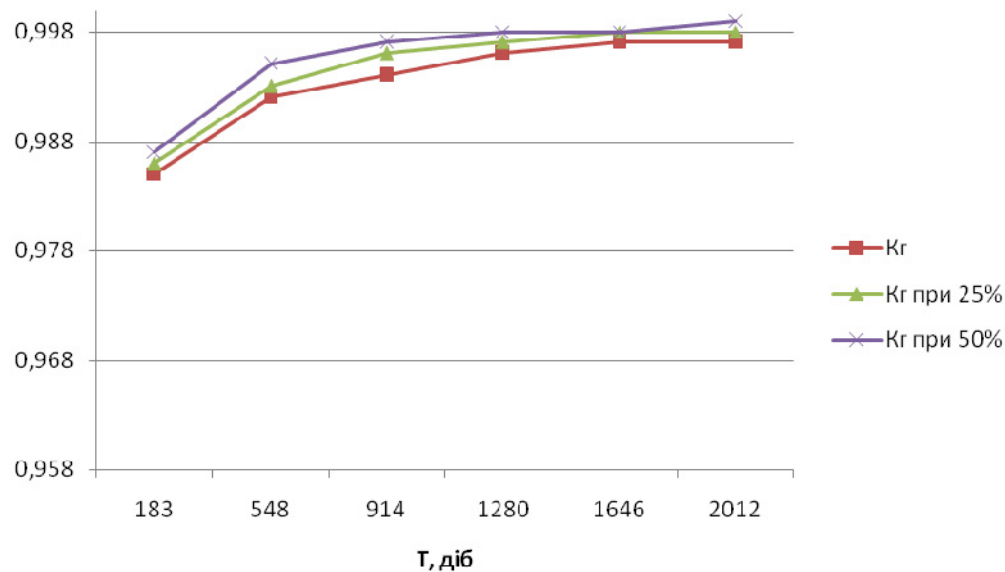


Рис. 4. Графік коефіцієнта готовності силового трансформатора з урахуванням поправочного коефіцієнта $K_n = 1,3$ на час виконання ремонтних робіт

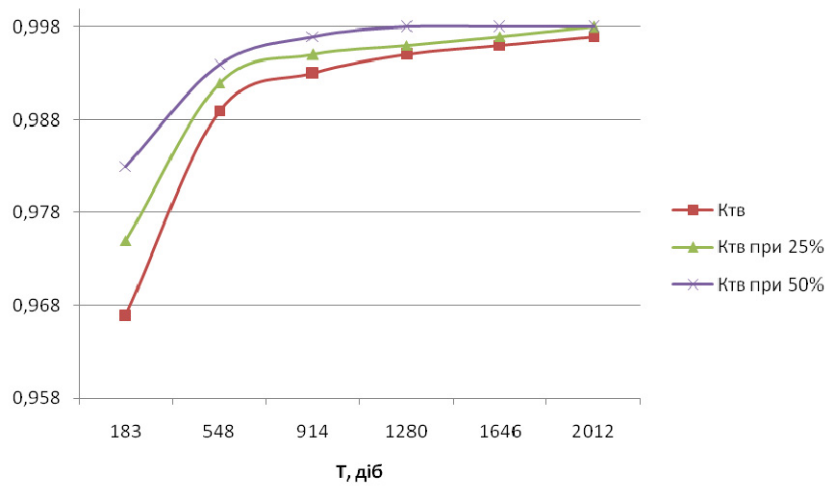


Рис. 5. Графік коефіцієнта технічного використання силового трансформатора з нормативним часом виконання ремонтних робіт

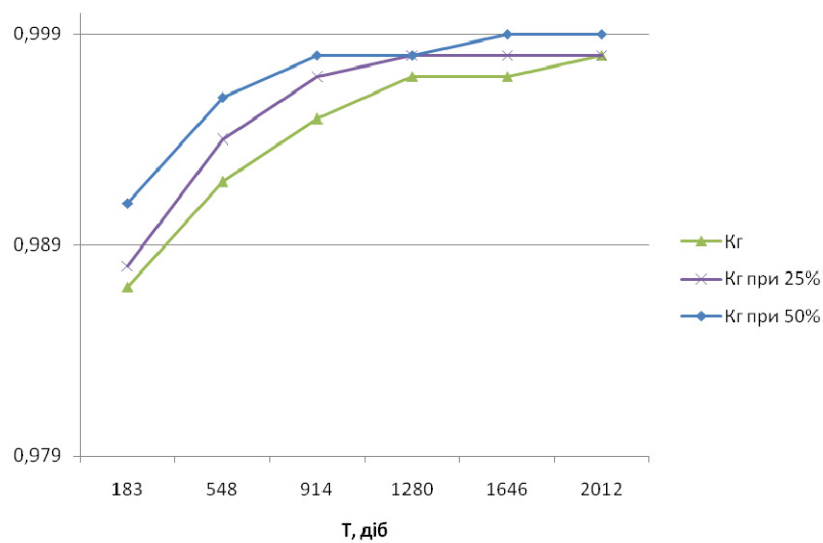


Рис. 6. Графік коефіцієнта готовності силового трансформатора з нормативним часом виконання ремонтних робіт

Таблиця 5

Матеріал, необхідний для проведення ТО і Р трансформаторів

Матеріал	Приблизна кількість	Вартість, грн
Силікагель індикаторний	150 грам	6,00
Силікагель	20 кілограм	500,00
Трансформаторне масло	1 тона	7720,31
Мастило ЦИАТИМ	150 грам	5,55
Уайт - спирт	200 мл	4,00
Волого - маслостійкий лак або емаль	200 гр	9,40
Запасне масло вказівне скло	1 шт	60,0
Гумові прокладки	2 кг	51,40
Обтиральний матеріал		5,00

Таблиця 6

Оклади та погодинні тарифні ставки обслуговуючого персоналу ТП

Посада	Оклад або погодинна тарифна ставка, грн. або грн./год
Електромеханік 2 гр.	3288,00
Електромонтер 3 розряду	11,74
Електромонтер 4 розряду	13,17

Як вже зазначалось, норма часу на вимірник поточного ремонту трансформатора становить $T_{np}=6,68$ нормо-годин (з урахуванням поправочного коефіцієнту 8,68 нормо-годин); міжремонтних випробування $T_{mv}=7,476$ нормо-годин (з урахуванням поправочного коефіцієнту 9,718 нормо-годин); середній час виконання 1-го періодичного огляду $T_{mo}=0,57$ нормо-годин [9].

Розрахуємо оплату праці працівників за поточний ремонт

$$C_{np} = (C_1 \cdot T_{np}) + (C_2 \cdot T_{np}) + (C_3 \cdot T_{np}),$$

де C_1 - посадовий оклад електромеханіка другої групи;

C_2 - тарифна ставка електромонтера 3-го розряду;

C_3 - тарифна ставка електромонтера 4-го розряду;

T_{np} - норма часу на виконання поточного ремонту.

З нормативним часом виконання планових ремонтних робіт за шість років експлуатації було 6 поточних ремонтів.

За нормою згідно НТД:

$$C_{np} = ((21,14 \cdot 6,68) + (12,68 \cdot 6,68) + (14,22 \cdot 6,68)) \cdot 6 = 1924,8 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 25%:

$$C_{np} = ((21,14 \cdot 6,68) + (12,68 \cdot 6,68) + (14,22 \cdot 6,68)) \cdot 4 = 1283,2 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 50%:

$$C_{np} = ((21,14 \cdot 6,68) + (12,68 \cdot 6,68) + (14,22 \cdot 6,68)) \cdot 3 = 962,4 \text{ грн.}$$

З урахуванням поправочного коефіцієнту, тобто фактично:

$$C_{np} = ((21,14 \cdot 8,68) + (12,68 \cdot 8,68) + (14,22 \cdot 8,68)) \cdot 6 = 2501,88 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 25%:

$$C_{np} = ((21,14 \cdot 8,68) + (12,68 \cdot 8,68) + (14,22 \cdot 8,68)) \cdot 4 = 1667,92 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 50%:

$$C_{np} = ((21,14 \cdot 8,68) + (12,68 \cdot 8,68) + (14,22 \cdot 8,68)) \cdot 3 = 1250,94 \text{ грн.}$$

Розрахуємо оплату праці за міжремонтні випробування. За даний період експлуатації було 1 міжремонтне випробування.

$$C_{mv} = (C_1 \cdot T_{mv}) + (C_2 \cdot T_{mv}) + (C_3 \cdot T_{mv}),$$

де C_1 - посадовий оклад електромеханіка другої групи;

C_2 - тарифна ставка електромонтера 3-го розряду;

C_3 - тарифна ставка електромонтера 4-го розряду;

T_{mv} - норма часу на виконання міжремонтних випробувань.

Згідно НТД [9]:

$$C_{mv} = (21,14 \cdot 7,476) + (12,68 \cdot 7,476) + (14,22 \cdot 7,476) = 359,13 \text{ грн.}$$

З урахуванням поправочного коефіцієнту, тобто фактично:

$$C_{mv} = (21,14 \cdot 9,718) + (12,68 \cdot 9,718) + (14,22 \cdot 9,718) = 466,839 \text{ грн.}$$

Розрахуємо оплату праці працівників за виконання періодичних оглядів. За даний період експлуатації було виконано 72 періодичні огляди електромеханіком другої групи.

$$C_{mo} = C_1 \cdot T_{mo},$$

де C_1 - посадовий оклад електромеханіка другої групи;

T_{mo} - норма часу на виконання періодичних оглядів.

$$C_{mo} = C_1 \cdot T_{mo} = (21,14 \cdot 0,57) \cdot 72 = 867,6 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 25%:

$$C_{mo} = (21,14 \cdot 0,57) \cdot 54 = 650,7 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 50%:

$$C_{mo} = (21,14 \cdot 0,57) \cdot 36 = 433,8 \text{ грн.}$$

Розрахуємо оплату праці працівникам за ТО і Р одного силового трансформатора за 6 років експлуатації.

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{mo},$$

де C_{np} - оплата праці за виконання поточного ремонту;

C_{mv} - оплата праці за виконання міжремонтних випробувань;

C_{mo} - оплата праці за виконання періодичних оглядів.

З нормативним часом виконання планових ремонтних робіт згідно НТД.

За нормою:

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{mo} = 1924,8 + 359,13 + 867,6 = 3151,53 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 25%:

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{mo} = 1283,2 + 359,13 + 650,7 = 2293,03 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 50%:

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{mo} = 962,4 + 359,13 + 433,8 = 1755,33 \text{ грн.}$$

З урахуванням поправочного коефіцієнту, тобто фактично:

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{mo} = 2501,88 + 466,839 + 867,6 = 3836,32 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 25%:

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{to} = 1667,92 + 466,839 + 650,7 = 2785,46 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 50%:

$$C = C_{np} + C_{mv} + C_{to} = 1250,94 + 466,839 + 433,8 = 2151,58 \text{ грн.}$$

Витрати на матеріал необхідний для проведення 1-го планового ремонту становитимуть $C_M = 8361,66$ грн. (табл. 5).

Розраховуємо середні витрати на ТО і Р за шість років експлуатації одного силового трансформатора та занесемо отримані дані до табл. 7.

$$C_{nor} = C + C_M,$$

де C - оплата праці працівникам за ТО і Р;

C_M - витрати на матеріал необхідний для проведення 1-го планового ремонту.

Середні витрати на ТО і Р з урахуванням поправочного коефіцієнту на час виконання планових ремонтних робіт (фактично):

$$C_{nor} = 3836,319 + 8361,66 \cdot 6 = 54006,28 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 25%:

$$C_{nor} = 2785,459 + 8361,66 \cdot 4 = 36232,01 \text{ грн.}$$

При зменшенні ПОР на 50%:

$$C_{nor} = 2151,579 + 8361,66 \cdot 3 = 27236,56 \text{ грн.}$$

Аналогічні розрахунки були проведені і для визначення середніх витрат на ТО і Р з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт (згідно нормативно технічної документації).

Як бачимо із табл. 7. при зменшенні загального часу на профілактичні роботи на 25 % дозволить скоротити витрати на ТО і Р одного силового трансформатора за шість років експлуатації приблизно на 17774,18 грн., а при зменшенні часу на 50% - на 26769,72 грн.

Результати

У результаті дослідження встановлено, що на сучасному етапі розвитку залізниць України удосконалення системи діагностування, ТО і Р електроустаткування ТП стає однією з основних задач підвищення надійності тягового електропостачання та вирішення проблеми скорочення витрат на ТО і Р.

Таблиця 7

Усереднені витрати на ТО і Р одного силового трансформатора за шість років експлуатації

Умова	Усереднені витрати на ТО і Р з нормативним часом виконання планових ремонтних робіт (згідно НТД), тис грн.	Усереднені витрати на ТО і Р з урахуванням поправочного коефіцієнту на час виконання планових ремонтних робіт (фактично), тис грн.
За нормою	53321,49	54006,28
З урахуванням зменшення загального часу на профілактичні роботи на 25 %	35739,67	36232,01
З урахуванням зменшення загального часу на профілактичні роботи на 50%	26840,31	27236,56

Для вирішення цієї проблеми необхідний вибір та застосування сучасних стратегій, таких як обслуговування за фактичним технічним станом силового електрообладнання ТП, суміщення обслуговування за фактичним технічним станом і ППР та процесного інжинірингу до управління системою ТО і Р за обраною цільовою функцією.

Найбільш повно вимогам процесного інжинірингу задовольняють комплексні показники надійності у вигляді цільових функціоналів готовності і технічного використання.

В результаті проведених розрахунків комплексних показників експлуатаційної надійності $K_2(T)$ та $K_{m6}(T)$ силового обладнання ТП встановлено їх збільшення в результаті визначення дійсних параметрів обладнання та обслуговування за фактичним технічним станом.

Підвищення комплексних показників експлуатаційної надійності силового електрообладнання ТП забезпечить більш надійну його роботу, а зменшення кількості планових профілактичних робіт дозволить скоротити витрати на проведення ТО і Р.

Зменшення часу на виконання планових ремонтів силових трансформаторів ТП дозволить зменшити витрати на проведення ТО і Р.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновані нові підходи подальшого удосконалення системи діагностики та ТО і Р тягових підстанцій електрифікованих залізниць з використанням технологій процесного інжинірингу, які покращують комплексні показники експлуатаційної надійності. Це дозволить підвищити експлуатаційну надійність роботи електрообладнання ТП, зменшити кількості ТО

і Р, скоротити витрати на проведення ТО і Р та скоротити час підготовки і виконання робіт.

Висновки

1. Обладнання ТП, що знаходиться в експлуатації, вже вичерпало свій ресурс і потребує поетапної модернізації, оновлення або заміни.

2. Перспективними методами рішення значених проблем є обслуговування за фактичним технічним станом силового електрообладнання ТП або суміщення ППР з обслуговування за фактичним технічним станом та процесний інжиніринг управління системою ТО і Р за ці-

льовими функціями готовності і технічного використання.

3. Проведене дослідження показує, що застосування таких підходів дозволить підвищити коефіцієнти готовності та технічного використання силового обладнання, підвищити експлуатаційну надійність; скоротити час на виконання планових ремонтних робіт до 50% та зменшити витрати на проведення ТО і Р одного силового трансформатора ТП за шість років експлуатації до 27236,56 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в (2002 - 2013) році [Текст]. – К.: ТОВ «ВД «Мануфактура», 2002 – 2013.

2. Савельев В. А. Принципы новой технологии управления техническим состоянием электрооборудования станций и подстанций / В. А. Савельев, А. Н. Назарычев // РНСЭ: Материалы докладов. Казань: Казан. Гос. энерг. ун-т, 2001. – т. II. – С.42-45.

3. Капиця, М. І. Стратегії експлуатації, технічного обслуговування та ремонту локомотивів / М. І. Капиця, Р. О. Коренюк // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2012. – Вип. 40. – С. 63-66.

4. Державний стандарт України ДСТУ ISO 9001:2009. Системи управління якістю. Вимоги. – На заміну ДСТУ ISO 9001:2001; надано чинності 2009-06-22. –К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 26 с.

5. ГОСТ 27.002.-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

6. Кузнецов В. Г. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання [начальний посібник] / В. Г. Кузнецов, О. Г. Галкін, О. В. Єфімов, О. О. Матусевич. – Д.: Вид-во Маковецький О.В., 2009 – 248 с.

7. Інструкція з технічного обслуговування і ремонту обладнання тягових підстанцій, пунктів живлення і секціонування електрифікованих залізниць – К.: ТОВ «Інпрес», 2008. – 125 с.

8. Технологічні карти поточного ремонту обладнання тягових підстанцій залізниць. – К., 2013. – 243 с.

9. Типові норми часу на поточний ремонт обладнання та пристроїв тягових підстанцій і постів секціонування електрифікованих залізниць. – К., 2013. – 252 с.

10. Азовцев, Ю. А. Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в рыночных условиях [Электронный ресурс] / Ю. А. Азовцев, Н. А. Баркова, В.А. Доронин // Журнал "Бумага, картон, целлюлоза", 1999. –Режим доступа: www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book17. – Загл. с экрана.

REFERENCES

1. Analiz roboti gospodarstva elektrifikatsiyi ta elektropostachannya v (2002 - 2013) rotsi [Tekst] [Analysis of the economy in electrification and power (2002 - 2013)year], – Kyiv, TOV «VD «Manufaktura», 2002 – 2013.

2. Savelev V.A., Nazaryichev A.N. Printsipyi novoy tehnologii upravleniya tehničeskim sostoyaniem elektrooborudovaniya stantsiy i podstantsiy [Principles of the new control technology technical condition of electrical stations and substations] // RNSE: Materialy dokladov. Kazan: Kazan. Gos. energ. un-t, 2001, vol. II, pp. 42-45

3. Kapitsya, M. I. Strategiyi ekspluatatsiyi, tehničnogo obslugovuvannya ta remontu lokomotiviv [Strategies for operation, maintenance and repair of locomotives]/M. I. Kapitsya, R. O. Korenyuk // VIsnik DnIpropetrovskogo natsIonalnogo unIversitetu zalIznichnogo transportu Im. akad. V. Lazaryana. – D., 2012, issue 40, pp. 63-66.

4. Derzhavniy standart UkraYini DSTU ISO 9001:2009. Sistemi upravlnnya yakIstyu. Vimogi. – Na zamInu DSTU ISO 9001:2001 [State Standard of Ukraine ISO 9001: 2009. Quality management systems. Requirements. - The replacement of ISO 9001: 2001]; nadano chinnostI 2009-06-22, K.: Derzhspozhivstandart Ukrayini, 2009, 26 p.

5. GOST 27.002.-89. Nadezhnost v tehnikе. Osnovnyie ponyatiya. Terminy i opredeleniya. [GOST 27.002.-89. Reliability engineering. Basic concepts. Terms and definitions]

6. Kuznetsov V.G., GalkIn O.G., EfImov O. V., Matusevich O.O. NadIynIst I dIagnostika pristroYiv tyagovogo elektropostachannya [nachalniy posIb-nik] [Reliability and diagnostics devices yraction power supply]. D., Vid-vo Makovetskiy O.V., 2009, 248 p.

7. InstruksIya z tehničnogo obslugovuvannya I remontu obladnannya tyagovih pIdstantsIy, punktIv zhivlennya I sektsIonuvannya elektriflkovanih zalIznits [Instructions for maintenance and repair of equipment traction substations, power points and sectioning electrified railways], Kyiv, TOV «Inpres», 2008, 125 p.

8. TehnologIchnI karti potochnogo remontu obladnannya tyagovih pIdstantsIy zalIznits [Technological maps current repair equipment railway traction substa-

11. Бабенко, И. А. Внедрение системы технического обслуживания по фактическому состоянию машинного парка завода [Электронный ресурс] / И. А. Бабенко // Материалы научно-технических проектов молодых специалистов НК ЮКОС, 2001. – Режим доступа: www.samara.sibintek.ru. – Загл. с экрана.

Надійшла до друку 17.10.2014.

tions], Kyiv, 2013, 243 p.

9. Tipovi normi chasu na potochniy remont obladnannya ta pristroyiv tyagovih pidstantsiy i postiv seksionuvannya elektrifikovanih zaliznits [Typical standard time of maintenance equipment and devices traction substations and sectioning posts electrified railways], Kyiv, 2013, 252 p.

10. Azovtsev Yu. A., Barkova N. A., Doronin V. A. Diagnostika i prognoz tehniceskogo sostoyaniya oborudovaniya tsellyulozno-bumazhnoy promyishlennosti v ryinochnyih usloviyah [Elektronniy resurs] [Diagnosis and prognosis of equipment condition pulp and paper industry in market conditions] // Zhurnal "Bumaga, karton, tsellyuloza", 1999, Rezhim dostupa: www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book17.

11. Babenko, I. A. Vnedrenie sistemyi tehniceskogo obsluzhivaniya po fakticheskomu sostoyaniyu mashinnogo parka zavoda [Elektronniy resurs] [Implementation of the system maintenance on the actual state of the machinery factory] // Materialy nauchno-tehnicheskikh proektov molodyih spetsialistov NK YUKOS, 2001, Rezhim dostupa: www.samara.sibintek.ru

Внутрішній рецензент *Костін М. О.*

Зовнішній рецензент *Сасько Ю. Л.*

Метою даної статті є аналіз існуючих систем технічного обслуговування і ремонту (ТО і Р) та дослідження експлуатації силового обладнання тягових підстанцій (ТП) з метою підвищення експлуатаційної надійності його функціонування та зниження аварійності за рахунок удосконалення системи діагностування. Пошук нових сучасних методів удосконалення системи діагностування та ТО і Р в процесі експлуатації ТП. Для досягнення поставленої мети проведено дослідження динаміки зміни комплексних показників надійності силового устаткування ТП у вигляді цільових функцій готовності і технічного використання з нормативним і фактичним часом виконання планових ремонтних робіт та переходу на ТО і Р за технічним фактичним станом. Проведено дослідження основних методів ТО і Р та діагностування пристроїв ТП електрифікованих залізниць.

У результаті дослідження встановлено, що перспективними методами вирішення зазначених проблем є процесний інжиніринг управління системою ТО і Р при обслуговуванні електрообладнання ТП за фактичним технічним станом. Проведені розрахунки підтверджують зменшення кількості профілактичних обслуговувань і поточних ремонтів обладнання ТП за рахунок удосконалення системи діагностування.

Запропоновано нові напрями удосконалення системи діагностики тягових підстанцій та системи ТО і Р з використанням технологій процесного інжинірингу, які покращують комплексні показники експлуатаційної надійності. Застосування даних підходів дозволяє покращити коефіцієнти готовності та технічного використання силового обладнання ТП, підвищити його експлуатаційну надійність, знизити кількість обслуговувань та відмов, знизити витрати на проведення ТО і Р.

Ключові слова: електропостачання, електрифіковані залізници, тягова підстанція, обладнання, процесний підхід, ТО і Р, діагностування, надійність, фактичний технічний стан, коефіцієнт готовності, коефіцієнт технічного використання.

УДК 621.331:621.311.4

В. Г. СЫЧЕНКО, А. А. МАТУСЕВИЧ, А. А. КИРИЧЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Электроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38(056)793-19-17, эл. почта: al_m0452@meta.ua

ПРОЦЕССНЫЙ ИНЖИНИРИНГ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Целью данной статьи является анализ существующих систем технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) и исследования эксплуатации силового оборудования тяговых подстанций (ТП) с целью повышения эксплуатационной надежности его функционирования и снижения аварийности за счет совершенствования системы диагностирования. Поиск новых современных методов совершенствования системы диагностики и ТО и Р в процессе эксплуатации ТП. Для достижения поставленной цели проведено исследование динамики изменения комплексных показателей надежности силового оборудования ТП в виде целевых функций готовности и технического использования с нормативным и фактическим временем выполнения

© Сиченко В. Г. та ін., 2014

плановых ремонтных работ и перехода на ТО и Р по техническому фактическим состоянием. Проведено исследование основных методов ТО и Р и диагностирования устройств ТП электрифицированных железных дорог.

В результате исследования установлено, что перспективными методами решения указанных проблем является процессный инжиниринг управления системой ТО и Р при обслуживании электрооборудования ТП по фактическому техническому состоянию. Проведенные расчеты подтверждают уменьшение количества профилактических обслуживаний и текущих ремонтов оборудования ТП за счет усовершенствовании системы диагностирования.

Предложены новые направления совершенствования системы диагностики тяговых подстанций и системы ТО и Р с использованием технологий процессного инжиниринга, которые улучшают комплексные показателя эксплуатационной надежности. Применение данных подходов позволяет улучшить коэффициенты готовности и технического использования силового оборудования ТП, повысить его эксплуатационную надежность, снизить количество обслуживаний и отказов, снизить затраты на проведение ТО и Р.

Ключевые слова: электроснабжение, электрифицированные железные дороги, тяговая подстанция, оборудование, процессный подход, ТО и Р, диагностирования, надежность, фактическое техническое состояние, коэффициент готовности, коэффициент технического использования.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Саенко Ю. Л.*

UDC 621.331:621.311.4

V. G. SICHENKO, O. O. MATUSEVICH, A. O. KIRICHENKO (DNURT)

Department of Power supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lazaryan Street, 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38(056)793 19 17, e-mail: al_m0452@meta.ua

PROCESS ENGINEERING IMPROVEMENT OF DIAGNOSIS TRACTION SUBSTATION

The purpose of this article is to analyze existing systems maintenance and repair and research operation of the power equipment of traction substations in order to improve operational reliability of its operations and reduce the accident rate by improving the system diagnostics. Search for new modern methods of improving the system of diagnosis and maintenance and repair in the operation of traction substations. To achieve this goal a study of the dynamics of complex change of reliability indices of power equipment of traction substations as target functions preparedness and technical use with standard and actual execution time of scheduled repairs and jump to the actual technical condition.

The study found that the promising methods for solving these problems is a process engineering management system maintenance and repair when servicing electrical equipment of traction substations on the actual technical condition. The calculations confirm the reduction in the number of preventive maintenance and current repairs of the equipment of the system due to the improvement of the diagnosis.

We propose new ways of improving the diagnostic system of traction substations and maintenance and repair system using technologies of process engineering that improve integrated display dozens of operational reliability. The application of these approaches can improve the availability and use of technical equipment of the power transformer substations, improve its operational reliability, and reduce the amount of maintenance and failure to reduce the costs of the maintenance and repair.

Keywords: electricity, electrified railways, traction substation, equipment, process approach, maintenance, repair, diagnosis, reliability, actual technical condition, availability, technical factor.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*

ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

В 2015 р. кафедра «Електропостачання залізниць» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна відзначає знаменну подію – 85-річчя від дня створення. З цієї нагоди запрошуємо всіх випускників та друзів кафедри на урочистості, які будуть проводитись на кафедрі.

Також доводимо до Вашого відома, що кафедрою заплановано в 2015 р. проведення наступних міжнародних конференцій:



СІК INSTYTUT KOLEJNICTWA

6-а Міжнародна науково-практична конференція ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ ТА В ПРОМИСЛОВОСТІ

10.06 – 12.06.2015

с.м.т. Воловець,
Закарпатська обл.



8-а Міжнародна науково-практична конференція

ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ ТРАНСПОРТУ

“ТРАНСЕЛЕКТРО-2015”

22.09 – 24.09.2015

м. Одеса

Запрошуємо до участі!

**ЕЛЕКТРИФІКАЦІЯ
ТРАНСПОРТУ**

науковий журнал

**ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ
ТРАНСПОРТА**

научный журнал

**ELECTRIFICATION
OF TRANSPORT**

scientific journal

Свідоцтво про державну реєстрацію № 17327 – 6097P від 14.10.2010 р.

ISSN 2307-4221 (print) ISSN 2312-6574 (online)

Передплатний індекс 68641

*Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 793 від 04.07.2014 р.
включений до Переліку наукових фахових видань України*

Передрук матеріалів здійснюється тільки з дозволу редакції

Члени редакційної колегії здійснюють рецензування та редагування статей

Статті друкуються українською, російською та англійською мовами

Журнал представлений у науково-метричних та реферативних базах даних

INDEX COPERNICUS
INTERNATIONAL

Uran
Український науковий журнал



*Редактор: Сиченко В. Г.
Комп'ютерна верстка: Босий Д. О.*

Поштова адреса:
49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
ДНУЗТ, кафедра «Електропостачання залізниць»,
тел.: (056) 373-19-11, факс.: (0562) 47-16-74
E-mail: elpostz@i.ua URL: <http://etr.diit.edu.ua/>

Формат 60×84 ¹/₈ Ум. др. арк. 14,8. Зам. № 194
Наклад 150 прим.

**Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна**

49010, Україна, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2
Тел.: +38(0562) 33-58-96, факс: +38(0562) 33-58-97



Компания ДАК-ЭНЕРГЕТИКА является ведущим предприятием в сфере строительства объектов тягового электропитания на Украине. Мы реализуем концепцию строительства «под ключ». Основные направления деятельности:

- Проектирование объектов электроснабжения;
- Строительство и реконструкция объектов электроснабжения, выполнение монтажных и пусконаладочных работ;
- Производство электротехнического оборудования до 35 кВ включительно:
 - Комплектные тяговые подстанции переменного и постоянного тока;
 - Комплектные распределительные устройства 27,5(35), 6(10) кВ переменного тока;
 - Комплектные распределительные устройства 3,3(0,6-1,0) кВ постоянного тока;
 - Низковольтные комплектные устройства 0,4 кВ;
 - Посты секционирования и пункты параллельного соединения;
 - Пункты группировки станции стыкования 27,5/3,3 кВ;
 - Преобразовательная техника;
 - Выключатели автоматические быстродействующие серии «ВАБ-20б».

Главный офис:

Украина, 03150,
г. Киев, ул. Тверская, 2
тел./факс: +38 (044) 500-78-17
info.kiev@dakenergo.com
www.dakenergo.com

