

Т. М. МІЩЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електропостачання залізниць», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. (099)136-96-25, ел. пошта: mishchenko_tn@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6336-7350

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПРИ ПАКЕТНОМУ РУСІ ШВИДКІСНИХ ПОЇЗДІВ

Постановка задачі

Одним з основних напрямів реалізації Транспортної стратегії України [1] і зокрема Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року [2] є «впровадження швидкісного руху пасажирських поїздів, передусім денних», шляхом підвищення швидкості їх руху до 160...200 км/год, а також підвищення швидкості руху вантажних поїздів до 100...120 км/год. Оскільки побудова спеціальних магістралей для такої мети являється заходом дорогим і тривалим тому організацію швидкісного руху в Україні передбачається здійснювати на реконструйованих залізничних лініях. При цьому, на першому етапі планується суміщати рух швидкісних пакетів пасажирських поїздів (з $V_{\max} = 200$ км/год) зі «звичайним» пасажирським (з $V_{\max} = 160$ км/год) і із спеціалізованим вантажним (з $V_{\max} = 120$ км/год), а також зі змішаним вантажним (з $V_{\max} = 100$ км/год) рухами поїздів. Згущення пасажирських поїздів в пакетах, що рухаються по фідерній зоні, суттєво впливає на такі важливі критерії розрахунку системи тягового електропостачання (СТЕ) як [3, 4]: рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу (ЕРС); струмове навантаження тягової мережі, яке дозволяє оцінити допустимий нагрів проводів контактної мережі і встановлену потужність електроустаткування тягових підстанцій (ТП); втрати потужності в тяговій мережі. Для відповіді на питання про максимальні та діючі значення цих величин необхідні їх дослідження в умовах швидкісного руху. Однак, на сьогодні на залізницях України поки що практично такий рух відсутній, а існують «звичайний» пасажирський (при $V_{\max} = 160$ км/год) і змішаний вантажний (з $V_{\max} = 100$ км/год) рухи, тому експериментальні дослідження неможливі. Залишається практично лише один метод вивчення електромагнітних процесів при швидкісному (а тим більше і при високошвидкісному) русі поїздів – метод математичного моделювання. Такої ж

думки притримуються і закордонні автори, зокрема, робіт [3, 5].

На сьогодні найбільш поширеними методами моделювання процесів в системах електричного транспорту є математичне та імітаційне. Математичне моделювання, яке базується на формалізованому описанні процесів у вигляді систем математичних рівнянь (складених за законами Кірхгофа), передбачає знання повних схем заміщення СТЕ і ЕРС. В цьому питанні «вузьким» місцем є отримання повної схем заміщення ЕРС. Справа в тому, що аналіз схемотехнічних рішень частково вже створених і перспективних (для швидкісного руху поїздів) ЕРС свідчить [6-8] про суттєву складність навіть їх структурних схем, не говорячи вже про розрахункові схеми заміщення та алгоритм їх роботи навіть одного поїзда на фідерній зоні. А при організації швидкісного руху на ділянці між тяговими підстанціями рухаються 3...4 і більше поїздів, а це означає необхідність врахування схем заміщення 3...4 і більше електровозів в математичній моделі системи.

Зазначене вище дозволяє стверджувати, що практично неможливо побудувати точну математичну модель такої складної нелінійної динамічної потужної системи як СТЕ тільки, як це зараз здійснюється, на основі теоретичного аналізу фізичних процесів, що протікають в пристроях чи підсистемах цієї системи з наступним використанням законів і методів теоретичної електротехніки. Якраз зазначене практично і гальмує математичне моделювання, а отже і прогнозування, процесів в перспективних СТЕ, особливо тих, що модернізуються для впровадження швидкісного і високошвидкісного руху поїздів. На нашу думку, розв'язання цієї проблеми можливо створенням імітаційних моделей всієї СТЕ, в якій модель ЕРС формують методами ідентифікації [8, 9]. Такий підхід цілком раціональний, оскільки математичне моделювання було більш застосованим в ті роки, коли не було потужної обчислювальної техніки і потрібного програмного забезпечення. Сучасний розвиток комп'ютерних технологій і досконалого програ-

© Міщенко Т. М., 2015

много забезпечення обумовлюють більш доцільним застосування імітаційного моделювання.

Аналіз останніх публікацій з проблеми

Наукових публікацій з імітаційного моделювання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання велика кількість, зокрема в Україні в останні роки це [10-14]. Однак вони стосуються руху поїздів при звичайних швидкостях (або без врахування ЕРС). Виключення складають лише роботи [3-5]. Проте в роботах [4, 5] не подано метод моделювання, не відома його процедура і результати подані дуже коротко. Робота [3], по-перше, виконана не на залізницях України (в Росії), по-друге, ЕРС заміщено ідеальним джерелом струму і, нарешті, автор не моделював процеси, а «просто» розрахував їх методом планування багатофакторних експериментів і регресійного аналізу. Тому ця робота може слугувати лише в орієнтовно методичному плані й в ніякому разі її результати не можуть бути використані для аналізу і впровадження швидкісного руху на залізницях України.

В роботах [15, 16] розрахунки, тим більше моделювання, процесів в тяговій мережі СТЕ не приведені, а в публікації [17] лише подана інформація, що в ВНДІЗТ (Росія) розроблено комп'ютерну модель процесів струморозподілення в контактній мережі, за допомогою якої можлива оптимізація її конструкції на стадії проектування чи при модернізації; власне модель і результати моделювання не приведені.

Мета роботи

Метою цієї роботи є розробка (в середовищі Matlab (Simulink)) імітаційної моделі електромагнітних процесів, що протікають в тяговій мережі змінного струму, при пакетному русі швидкісних поїздів, а також її застосування для визначення напруги на струмоприймачі електровоза, його струму, а також фідерного струму і втрат потужності в тяговій мережі при різній кількості поїздів в пакеті, інтервалі часу попутного прямування та міжпідстанційної відстані.

Умови формування моделей

Система тягового електропостачання. Багатьма спеціалістами в області електричного транспорту, зокрема в [6, 7, 15, 17-19], вважається, що існуюча система тягового електропостачання постійної напруги 3,3 кВ при певній її модернізації шляхом підсилення дозволить організувати швидкісний рух поїздів з $V_{\max}$ до 200 км/год. Підсилення цієї системи доцільно, насамперед,

підвищенням напруги в тяговій мережі на першому етапі до 6 кВ, а потім – до 12 кВ за рахунок переходу від існуючої централізованої системи живлення тягової мережі до схеми розподіленого живлення від лінії повздовжнього електроживлення певної постійної чи змінної напруги. Однак, все ж світовий досвід показує, що на ділянках з швидкісними поїздами застосовується виключно СЕТ змінного струму 27,5 кВ (особливо з підсилюючими і екрануючими проводами), яка має дуже широку можливість маневру енергетичної ефективності в залежності від розмірів руху поїздів [2020]. Тому в цій роботі при моделюванні використано СЕТ змінного струму 27,5 кВ, 50 Гц. При цьому в якості моделі тягової підстанції (ТП) прийнято реальне джерело синусоїдної е.р.с. з внутрішнім активним опором $R_{\text{ТП}} = 0,176 \text{ Ом}$ та індуктивністю $L_{\text{ТП}} = 0,00177 \text{ Гн}$. Міжпідстанційна ділянка одноколійна з лінійною однорідною контактною підвіскою ПБСМ-95+МФ-100 і рейками типу Р65; питомі параметри тягової мережі: $R_{\text{ТМ}} = 0,112 \text{ Ом/км}$, $L_{\text{ТМ}} = 0,848 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/км}$ [21, 22]. Схема живлення – двостороння. Вихідні напруги на шинах ТП прийняті однаковими.

Електрорухомий склад

На сьогодні на залізницях України існують «звичайний» пасажирський і змішаний вантажний рух поїздів забезпечуються електровозами типів: ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11, ЧС, ДЕ1, ДС3, ВЛ60, ВЛ80 та ін. Схемотехнічно зазначені серії електровозів відносно не складні. І тому при математичному моделюванні електромагнітних і електроенергетичних процесів зображують їх повні схеми заміщення (з наступним складанням системи рівнянь). Однак за своїми схемотехнікою і параметрами ці типи ЕРС вже не можуть забезпечити необхідне на сьогодні підвищення пропускної і провізної здатностей електричних залізниць, тим більше при впровадженні швидкісних і високошвидкісних перевезень [6, 7, 15-17]; необхідна суттєва модернізація або побудова нових типів. При цьому всі спеціалісти вважають, що для виконання вищезазначеного потрібно щоб тяговий привод перспективних електровозів (і електропоїздів) для швидкісного і високошвидкісного рухів будувався на безколекторних тягових двигунів (ТЕД) і найчастіше – на основі асинхронних короткозамкнених ТЕД [6, 7, 23-25]. При цьому, ці ТЕД повинні живитись (через певні тягові перетворювачі) від контактної мережі як постійної, так і змінної напруги. Тим самим з'являється необхідність створення двосистемних типів ЕРС.

В роботі при моделюванні прийнято, що рух швидкісних поїздів здійснюється електровозом типу ЕД 4, який заплановано виготовляти на базі модернізованого електровоза ДС 3 і який буде мати максимальну швидкість 200 км/год [26]. Суттєва схемотехнічна складність зазначених вище ЕРС обумовила застосувати в цій роботі ідентифікаційну модель електровоза ЕД 4 у вигляді пасивного двополюсника з послідовним з'єднанням нелінійного (статичного) резистивного елемента R та параметричної індуктивності L [27]. При цьому закономірність зміни L в часі за період прикладеної напруги при діючих значеннях струму навантаження 20; 50; 100 А приведена на рис. 1.

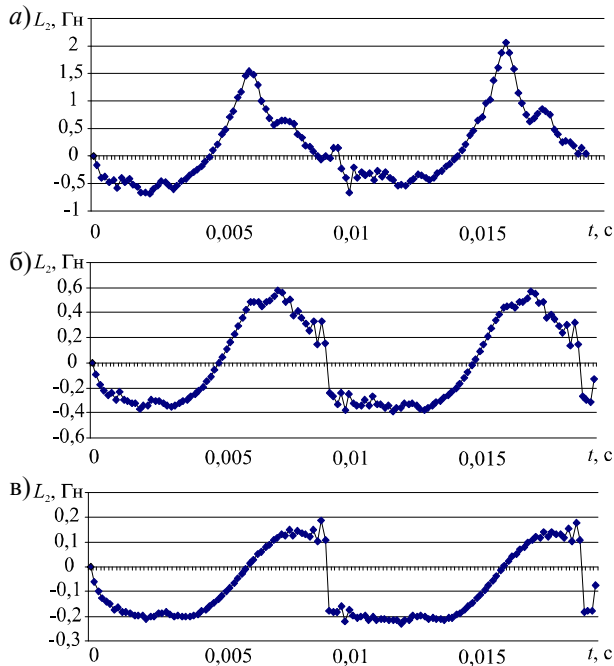


Рис. 1.

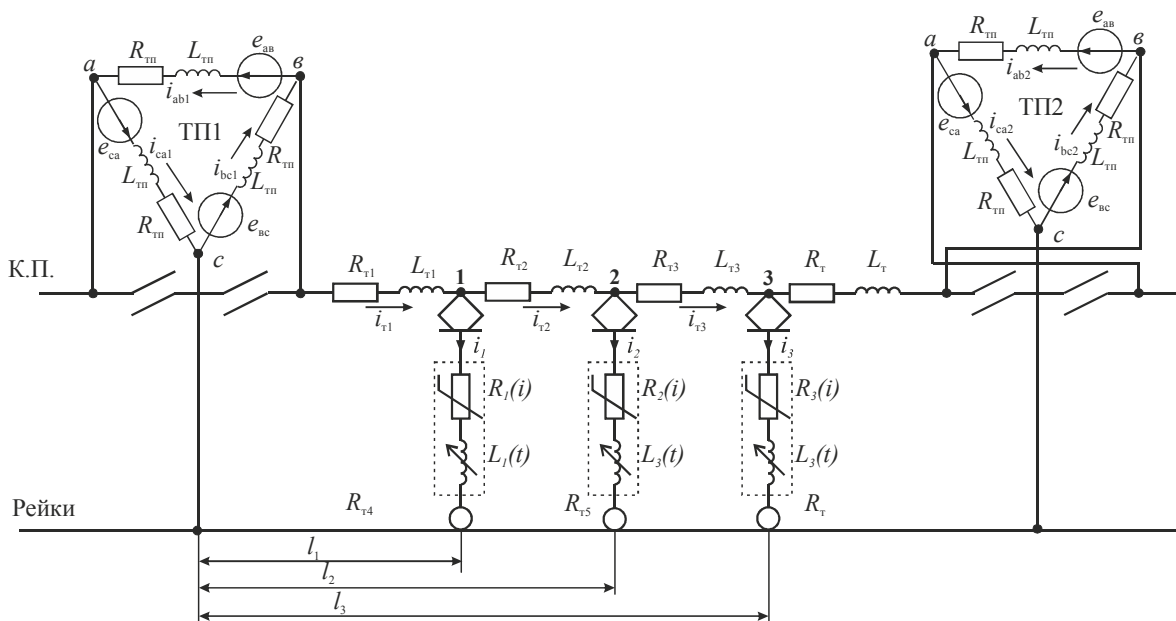


Рис. 2.

При моделюванні використали еквівалентні значення R і L , і вони склали: для електровоза №1 – $R_1 = 133,05$ Ом, $L_1 = 0,077$ Гн; для електровоза №2 – $R_2 = 281,2$ Ом, $L_2 = 0,22$ Гн.

Загальна схема фідерної зони на прикладі трьох поїздів, що рухаються, представлена на рис. 2.

Схеми імітаційного моделювання

На рис. 3-4, в якості прикладу представлено розроблені в цій роботі імітаційні моделі розрахунку електричних процесів в системі тягового електропостачання при швидкості руху поїздів 200 км/год.

Взагалі моделювали 6 варіантів миттєвих схем розташування поїздів на фідерній зоні (табл. 1).

Таблиця 1

Номер варіанта	Міжпідстанційна відстань, ℓ , км	Кількість поїздів в пакеті, n	Інтервал часу попутного прямування, Δt , хв.
1	60	3	5
2	60	3	6
3	60	3	7
4	60	4	5
5	80	3	6
6	80	4	7

Рух поїздів в пакеті починається в точці (в місці), яка розташована на відстані 1 км від ТП № 1. Визначали напругу на струмоприймачах електровозів, їх струм, а також струм і втрати потужності на ділянках тягової мережі.

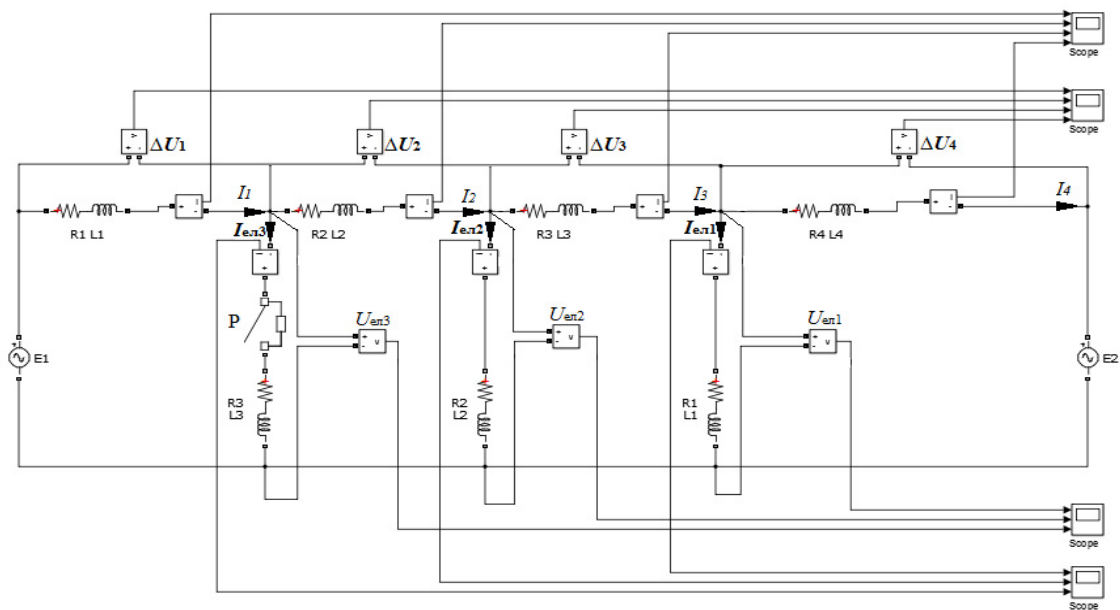


Рис. 3.

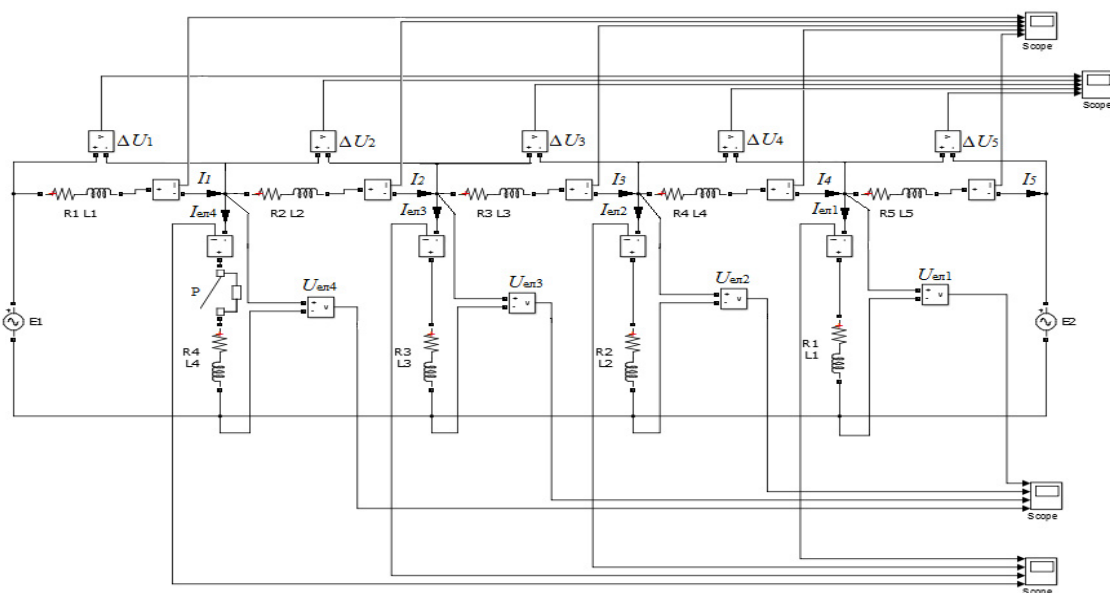


Рис. 4.

Оскільки параметри тягової мережі прийняті лінійними, а підстанційна живляча напруга являється синусоїдною, тому всі розрахункові миттєві величини (напруги, струми і т. д.) отримані синусоїдними, що й мається на увазі у подальшому аналізі, а приведені результати подані для діючих значень. При цьому перехідний процес на осцилограмах розрахункових величин при «вмиканні» чергового поїзда не помітний оскільки він короткочасний (не більше 1,5 мс) і тому спостерігається зразу ж установлений режим. Це цілком закономірно і пояснюється великим значенням вхідних активних опорів електровозів.

Проаналізуємо результати моделювання.

Результати моделювання та їх аналіз

З аналізу даного моделювання випливає, що при пакетному русі поїздів всі основні величини мають особливий екстремальний (мінімум чи максимум) характер зміни; розглянемо ці зміни.

Рівень напруги на струмоприймачі. Одним із основних, дуже важливих, критеріїв розрахунку пристроїв СТЕ електрифікованих залізничних ліній зі швидкісним рухом являється напруга U на струмоприймачі електрорухомого складу. Це обумовлено безпосередньою залежністю швидкості руху V від зазначеної напруги. Зокрема встановлено [28], що для СТЕ змінного струму при русі зі $V = 200$ км/год зниження середньої

V_{cp} (при $U < U_{ном}$) швидкості відносно усталеного її значення $V_{уст}$ (при $U > U_{ном}$) пропорційне максимальному відхиленню напруги ΔU_{max} відносно $U_{ном}$, тобто:

$$\Delta V = V_{уст} - V_{cp} = \frac{8}{3} \Delta U_{max}, \quad (1)$$

$$\text{де } \Delta U_{max} = \Delta U_{cp} \cdot C_{\Delta U}^{-1}, \quad (2)$$

$$\text{а } \Delta U_{cp} = U_{ном} - U_{cp}, \quad (3)$$

де U_{cp} – середня величина діючого значення напруги на струмоприймачі ЕРС при його русі на міжпідстанційній зоні за термін часу проходження одного поїзда чи пакету поїздів;

коефіцієнт $C_{\Delta U} = 0,56 \dots 0,7$ [28].

Величина U_{cp} являє собою відношення середньої потужності, розрахованої для поїзда або групи поїздів в пакеті, до відповідного середнього струму:

$$U_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_{ni}} \int_0^{t_{ni}} U_{ni} I_{ni} dt}{\sum_{i=1}^n \int_0^{t_{ni}} I_{ni} dt}, \quad (4)$$

де U_{ni}, I_{ni}, t_{ni} – відповідно напруга на струмоприймачі, струм ЕРС, термін часу руху на міжпідстанційній зоні для i -того поїзда.

Середня напруга U_{cp} представляє собою інформативний характеризуючий параметр, який найбільш правильно відображає якість електроживлення високошвидкісних поїздів. І тому СТЕ в період пропуску зазначених поїздів повинна забезпечувати певний заданий рівень напруги згідно Правил технічної експлуатації (ПТЕ) СТЕ (табл.2).

Таблиця 2

Допустимі значення напруги на струмоприймачі

Швидкість руху, км/год	до 160	161...200	201...250	251...300
Максимальна напруга, кВ	29,0	29,0	29,0	29,0
Мінімальна напруга, кВ	21,0	24,0	24,0	24,0

Зниження напруги нижче мінімального значення неприйнятне оскільки буде, як зазначалось вище, призводити до зниження швидкості й тим самим до порушення графіка руху поїздів.

На рис. 5, а-г за даними моделювання представлені графічні залежності напруги на стру-

моприймачі електровоза $U_{ел}$ від шляху руху 3-х і 4-х поїздних пакетів від ТП1 до ТП2. Цифри кривих залежностей вказують на номер віріанта моделювання (згідно табл. 2), а числа 1 та 2 біля пунктирних ліній-ординат свідчать про номер електровоза з поїздом.

Як випливає із цих рисунків, величина $U_{ел}$ закономірно змінюється і її мінімуми зміщуються в напрямку до ТП2. Зменшення $U_{ел}$ відбувається приблизно до координати шляху руху, яка знаходиться на $\frac{3}{4}$ частини міжпідстанційної зони від ТП1. Далі напруга підвищується за рахунок дії ТП2. Не дивлячись на зменшення, необхідна вимога допустимого значення, щоб $U_{ел}$ було більше 24,0 кВ (табл. 1 при $V = 200$ км/год), виконується: найменше значення $U_{ел}$, що дорівнює 26,7 кВ, має місце при $n=4$ і $\Delta t=5$ хв. При цьому середні значення U_{cp} напруги на струмоприймачі при русі на всій фідерній зоні склали відповідно 26,7 і 26,8 кВ.

Вплив факторів ℓ , Δt і n (табл. 2) на зміну напруги на струмоприймачі такий: збільшення міжпідстанційної відстані ℓ призводить до збільшення $U_{ел}$ (рис. 5, а); така ж сама дія інтервалу часу попутного прямування Δt (рис. 5, а, кр. 3 і рис. 5, б, кр. 2); в той же час зміна кількості поїздів в пакеті практично не впливає на зміну $U_{ел}$ (рис. 5, в).

Виконання вимоги по рівню напруги в розглянутих випадках цілком зрозуміло і пояснюється відносно невеликим значенням питомої потужності навантаження на фідерну зону, яка склала 0,21 МВА/км при $\Delta t=5$ хв, та невисокою швидкістю руху (200 км/год), в той час як, згідно [18], максимальна питома потужність на лінії може досягати 1,3...1,4 МВА/км (при $V = 300$ км/год і $\Delta t=3 \dots 4$ хв.).

Зміна фідерного струму. Фідерний струм I_{ϕ} має імпульсний характер з максимумом ~ 340 А при $n=4$ і який розташовується в середніх міжпоїздних ділянках фідерної зони (рис. 6, а-г). При зменшенні кількості поїздів до $n=3$ значення I_{ϕ} , незалежно від інтервалу прямування Δt , не перевищує 235 А.

Зі збільшенням міжпідстанційної відстані (рис. 6, а) і кількості поїздів в пакеті (рис. 6, в) фідерний струм зростає. В той же час зростання I_{ϕ} має місце при зменшенні інтервалу часу попутного прямування (рис. 6, а кр.3 і рис. 6, б, кр. 2).

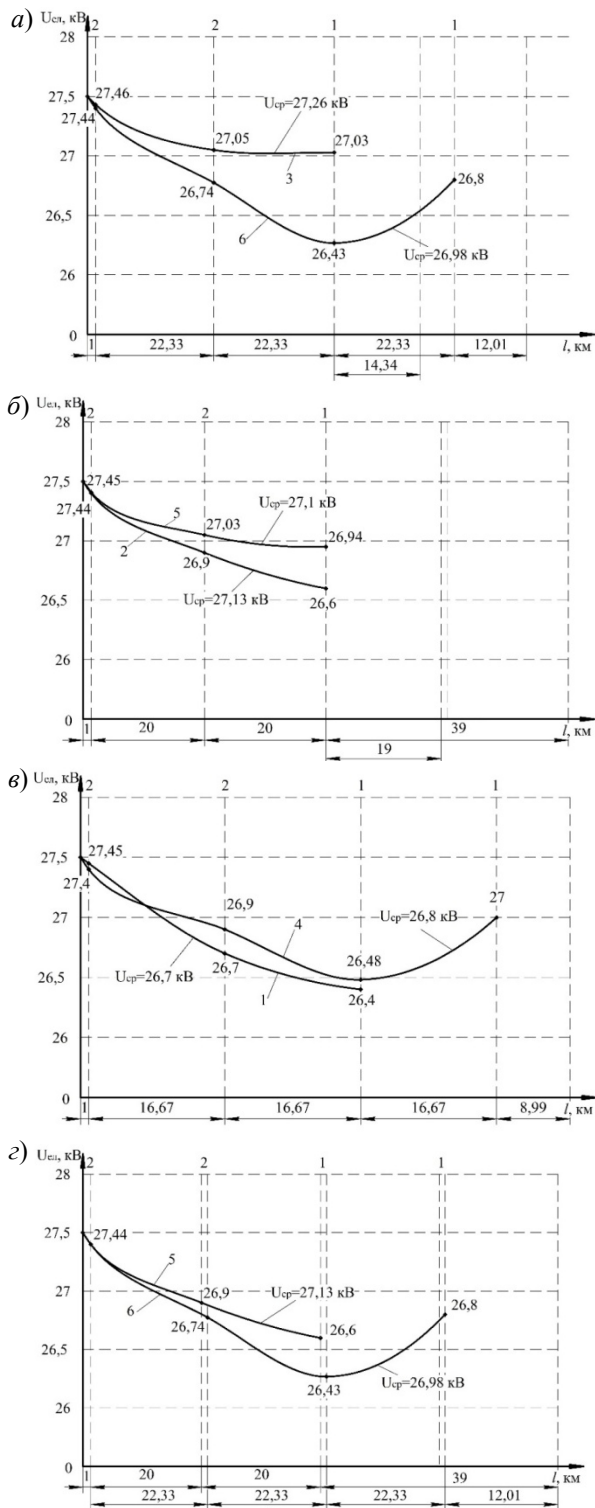


Рис. 5.

Струм електровозів. На відміну від існуючих методик розрахунку параметрів системи тягового електропостачання, в яких струм електровозів задавався за тяговими розрахунками, в цій роботі задавали параметри (R і L) власне електровоза (електровоз №1 і №2), а його тяговий струм розраховувався при моделюванні (рис. 7).

Втрати потужності в тяговій мережі. Збільшення інтервалу попутного прямуювання поїздів

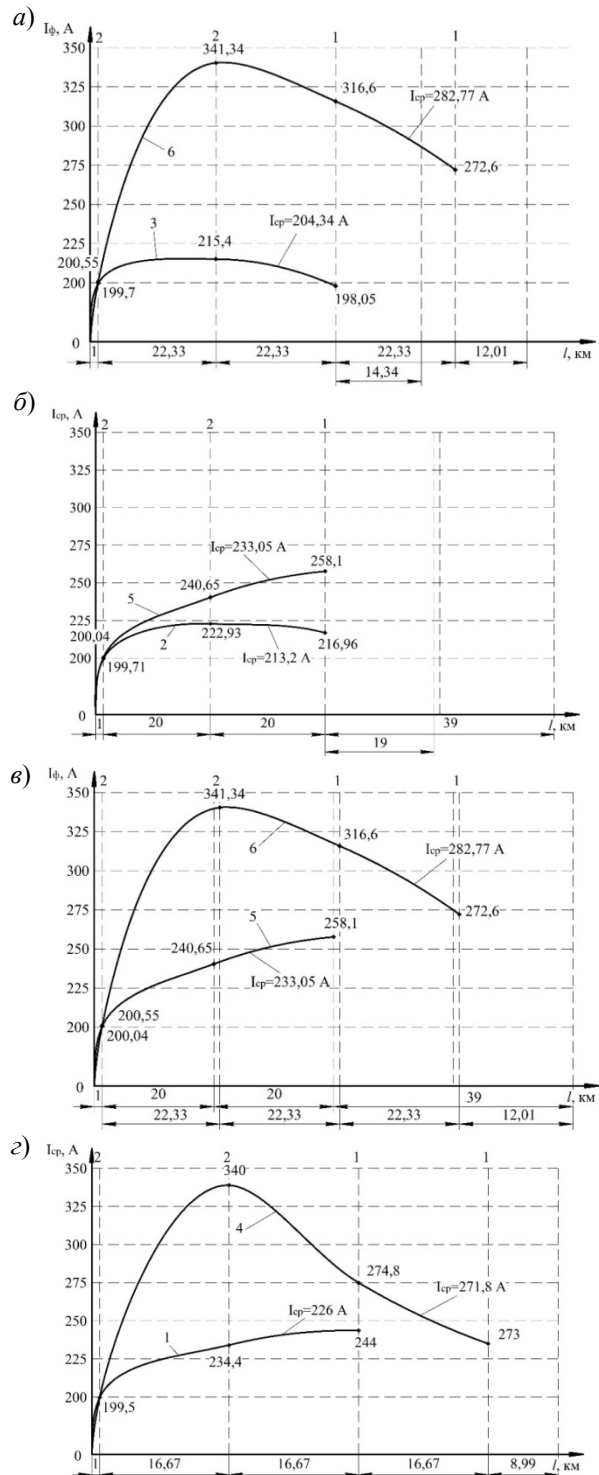


Рис. 6. Залежність струму на ділянках від шляху руху поїздних пакетів

в їх пакеті з 5 до 7 хвилин (при $n=3$) призводить до зменшення втрат потужності ΔP в проводах тягової мережі на 26% (табл. 3). В той же час, збільшення кількості поїздів в пакеті (на 1 поїзд) призводить до підвищення ΔP в 1,8 рази. Останнє повинно враховуватися в складі технологічних втрат, які входять, в так звані, умовні втрати, що визначаються різницею показів електричних лічильників на тяговій підстанції і на електрорухомому складі.

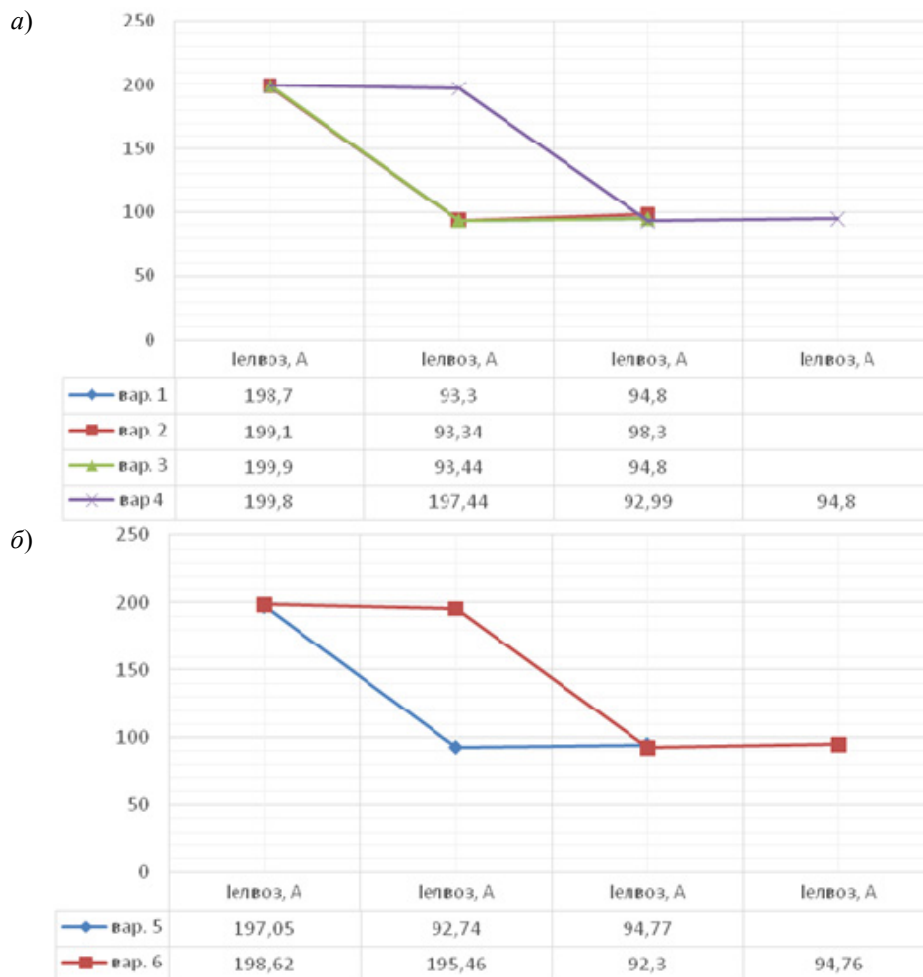


Рис. 7. Графіки струмів електровозу: а) при $\ell = 60$ км , б) $\ell = 80$ км

Таблиця 3

Кількість поїздів в пакеті, n	Інтервал часу попутного прямування, Δt , хв	Втрати потужності, ΔP , кВт	Довжина міжпідстанційної ділянки, ℓ , км
3	5	303,24	60 км
3	6	275,54	
3	7	240,5	
4	5	546,08	
3	5	399,22	80 км
4	5	710,71	

Висновки

1. Вимоги ПТЕ електрифікованих залізниць України щодо допустимого значення рівня напруги на струмоприймачі електровоза при заданих умовах імітаційного моделювання виконуються. Найбільший вплив на зміну напруги мають міжпідстанційна відстань, струм електровоза та інтервал часу попутного прямування; кількість поїздів в пакеті практично не впливає на цю величину.

2. Струмове навантаження фідерної зони при пакетному рухові швидкісних поїздів має імпульсний характер. Найбільший вплив на фідерний струм мають: міжпідстанційна відстань та інтервал часу попутного прямування; кількість поїздів в пакеті впливає «в середньому».

3. Збільшення втрат потужності в тяговій мережі при пакетному пропуску поїздів повинно враховуватися в складі технологічних втрат, які входять в умовні втрати, що визначаються різницею показів лічильників електричної енергії на тяговій підстанції і на електрорухомому складі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

REFERENCES

1. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010р. №2818-VI.
2. Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року // Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 16 грудня 2009р. №1555-Р.
3. Biesenack, H. Тяговое электроснабжение высокоскоростных линий // Железные дороги мира, 2001, №6. – С.26 – 30.
4. Степанская, О. А. Особенности формирования нагрузок электротяговой сети скоростных линий железных дорог. Дисс. на соис. уч. ст. к.т.н., спец.: 05.22.07 – подвижной состав тел. дорог, тяга поездов и электрификация. – Санкт-Петербург, 2004. – 135с.
5. Hauptmann, A. Мощность тяговых подстанций для высокоскоростных линий. / A. Hauptmann // Железные дороги мира – 2002. – №8. – С.47-51.
6. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – № 4. – С.104-114.
7. Хворост, Н.В. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения. / Н.В. Хворост, Ю.П. Гончаров, Н.В. Панасенко, Н.Н. Панасенко // Залізничний транспорт України. – 2003. – №6. – С.25-31.
8. Міщенко, Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка і Електроенергетика. – 2014. – № 1. – С.19-28.
9. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; паралельне з'єднання елементів / Т. М. Міщенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 41. С.86 – 91.
10. Босий, Д.О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму / Д.О. Босий // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2008. – Вип. 24. С.49 – 54.
11. Босий, Д.О. Математичне моделювання електротягового навантаження в задачах вивчення електромагнітних процесів для систем електропостачання електричного транспорту змінного струму / Д.О. Босий, В.Г. Сиченко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. – 2009. – Ч.3. – С.86-89.
12. Сиченко, В.Г. Моделювання електротягового навантаження в задачах електромагнітної сумісності електрифікованих залізниць постійного струму / В.Г. Сиченко, Є.М.Гайсьонюк // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2010. – Ч.2. – С.185-188.
13. Лагута, І.І. Моделювання системи тягового

1. *Transportna strategiya Ukraini na period do 2020 roku* [Transport Strategy of Ukraine till 2020]. Approved by Cabinet of Ministers of Ukraine 21.12.2010 №2818-VI.
2. *Pro shvalennya Strategiyi rozvitku zaliznichnogo transportu na period do 2020 roku* [On approval of the Strategy of railway transport development for the period till 2020]. The Cabinet of Ministers of Ukraine. Order of 16 December 2009. №1555-P.
3. Biesenack H. *Tjagovoe jelektrснабzhenie vysokoskorostnyh liniy* [Traction power supply high-speed lines]. *Zheleznye dorogi mira – Railroad of the world*, 2001, №6. – P.26 – 30.
4. Stepanskaya O.A. *Osobennosti formirovaniya nagruzok jelektriotjagovoj seti skorostnyh liniy zheleznyh dorog* [Features of formation of the electrical traction loads the network of high-speed railway lines]. *Diss. na gois. uch. st. k.t.n., spec.: 05.22.07 – podvizhnoj sostav tel. dorog, tjaga poezdov i jelektrifikacija*. – Diss. on SOEs. art PhD, spec.: 05.22.07 - rolling tel roads, traction of trains and electrification. – St. Petersburg, 2004. – 135p.
5. Hauptmann A. *Moshchnost tyagovyh podstantsiy dlya vysokoskorostnyh liniy* [Power traction substations for high-speed lines]. *Zheleznye dorogi mira – Railways of the world* - 2002. - №8. - P.47-51
6. Hvorost N.V., Panasenکو N.V. *E'lektricheskie zheleznye dorogi: e'tapy i perspektivy razvitiya* [Electric Railways: stages and perspectives of development]. *Elektrotehnika i Elektromexanika – Electrical engineering and Electromechanics*. - 2003. - № 4. - P.104-114.
7. Hvorost N.V., Goncharov J. P., Panasenکو N. V., Panasenکو N. N. *Sovershenstvovanie e'lektricheskoy tyagi postoyannogo toka zheleznyx dorog Ukrainy dlya skorostnogo passazhirskogo dvizheniya* [The development of electric traction DC Railways of Ukraine for speed passenger traffic]. *Zaliznichnij transport Ukraini – Railway transport of Ukraine*. -2003. - No. 6. P. 25-31.
8. Mishchenko T.M. *Perspektivi shemotekhnichnih rishen i modelyuvannya pidsystem elektrichnoyi tyagi pri visokoshvidkysnomu rusi poyzdiv* [Prospects circuit design and modeling subsystems of electric traction under high-speed trains]. *Elektrotehnika i Elektroenergetika – Electrical and power*. - 2014. - No. 1. - Page 19-28.
9. Mishchenko T.M. *Teoretichni aspekty ta metody identyfikaciyi parametriv pristroiv sistemi elektrichnoyi tyagi. Metod mittsevyh potuzhnostey; paralel'ne z'ednannya elementiv* [Theoretical aspects and methods of identification of parameters of devices of the electric traction system. The method of instant capacity; parallel connection of elements]. *Visnik DNUZT – Bulletin of Dnepropetr. NAT. Univ Rail. Tr. Acad. V. Lazaryan – D.: DNURT*, 2012. - Vol. 41. P. 86 - 91.
10. Bosiy D.O. *Imitatsiyne modelyuvannya sistemi tyagovogo elektropostachannya dlya doslidzhennya pokaznykiv yakosti elektrichnoyi energiyi na tyagovyh pidstantsiyah zminnogo strumu* [Modeling of electric traction system for the study of indicators of quality of electric energy for traction substations AC]. *Visnik DNUZT – Bulletin of Dnepropetr. NAT. Univ Rail. Tr. Acad. V. Lazaryan - D : DNURT*, 2008. - Vol. 24. P. 49 - 54.
11. Bosiy D.O., V.G. Sichenko *Matematichne*

електропостачання з напівпровідниковими перетворювачами залізниць постійного струму. / І.І. Лагута, Ю.П. Гончаров, М.В. Панасенко, В.В. Замаруєв, В.В. Івахно, В.В. Божко, В.Н. Козачок, О.В. Сушко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск – 2011. – Ч.2. – С.258-264.

14. Сиченко, В.Г. Моделювання електромагнітних процесів перетворення електричної енергії на тяговій підстанції постійного струму / В.Г. Сиченко, Б.А. Рябокінь, О.Д. Словак // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск – 2011. – Ч.2. – С.245-250.

15. Киселів, І.П. Высокоскоростной железнодорожный транспорт: современные вызовы и перспективы развития. / И.П. Киселёв // Железнодорожный транспорт. –2012. –№11. –С.44-49.

16. Саввов, В.М. Обоснование параметров тягового электроснабжения и электроподвижного состава высокоскоростных железнодорожных линий в России. Дисс. на соис. уч. ст. к.т.н., спец.: 05.22.07 – подвижной состав тел. дорог, тяга поездов и электрификация. – Санкт-Петербург, 2002. – 136с.

17. Косарев, А.Б. Проблемы развития скоростного движения. / А.Б. Косарев, О.Н. Назаров // Материалы Второго международного симпозиума «Eltrans`2003», Санкт-Петербург. –2003. –С.42-54.

18. Марыкин, А.Н. Схемотехника современных тяговых подстанций постоянного тока и перспективные системы электроснабжения. / А.Н. Марыкин // Материалы международного симпозиума «Eltrans`2001», Санкт-Петербург. –2002. –С.147-155.

19. Котельников, А. Основные требования к системам и устройствам тягового электроснабжения скоростных и высокоскоростных магистралей. / А. Котельников // 6th International Conference “Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe”, Warszawa, Poland, –2003. –P.35-41.

20. Бадёр, М.П. Концепция обновления и перспективы технического развития систем тягового электроснабжения /М.П. Бадёр, В.Г. Сыченко // Технічна електродинаміка. Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. Частина 2. –Київ. – 2009. –С.88-93.

21. Міщенко, Т.М. Математичне моделювання перехідних процесів в системі змінного струму «тягова мережа – електровоз» 1. Вмикання силового трансформатора електровоза в режимі холостого ходу; оцінка параметрів / Т.М. Міщенко, А.І. Кійко // Вісник ДНУЗТ. – 2011. – Вип.36. – С. 88-93.

22. Справочник по электроснабжению железных дорог. Под ред. К.Г. Марквардта. – М.: Транспорт, 1980. –256 с.

23. Сорин, Л.Н. Электровозы нового поколения и организация их разработки / Л.Н. Сорин, В.П. Янов // Материалы Второго международного симпозиума «Eltrans`2003», Санкт-Петербург. – 2003. – С.115-122.

24. Сергієнко, М.І. Основні вимоги і схемотехнічні рішення тягового частотно-регульованого електроприводу пасажирських електровозів. / М.І. Сергієнко, М.В. Панасенко // Залізничний транспорт України. –2009. –№5. –С.43-54.

modelyuvannya elektroyagovogo navantazhennya v zadachah vivchennya elektromagnitnih protsesiv dlya sistem elektropostachannya elektrichnogo transportu zminnogo strumu [Mathematical modeling of electrical traction load problems in the study of electromagnetic processes for electric vehicle power supply systems AC]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk* – Technical electro-dynamics. Thematic issue. – 2009 – Part 3. – P.86-89

12. Sichenko V.G., Haysonok Ye.M. *Modelyuvannya elektroyagovogo navantazhennya v zadachah elektromagnitnoyi sumisnosti elektrifikovanih zaliznits postynogo strumu* [Modeling of electrical traction load in problems EMC electrified railways DC] / *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk «Silova elektrodinamika ta energoeftivnist»* – Technical electro-dynamics. Thematic issue. Power Electronics and Energy Efficiency. – 2010 – Part 2. – P.185-188.

13. Lahuta I.I., Goncharov J.P., Panasenkov M.V., Bozhko V.N., Kozachok V.V., Zamaruyev V.V., Ivahno V.V., Sushko O.V. *Modelyuvannya sistemi tyagovogo elektropostachannya z napivprovodnikovimi peretvoryuvachami zaliznits postynogo strumu* [Modeling of traction power supply with semiconductor converters DC Railway]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk* – Technical electro-dynamics. Themed Issue – 2011 – Part 2. – P.258-264.

14. Sichenko V.G., Ryabokon B.A., Slovak O.D. *Modelyuvannya elektromagnitnih protsesiv peretvorenniya elektrichnoyi energiyi na tyagoviy pidstantsiyi postynogo strumu* [Modeling of electromagnetic processes for converting electrical energy substation DC] / *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichniy vipusk* – Technical electro-dynamics. Themed Issue – 2011 – Part 2. – P.245-250.

15. Kysel'ev I.P. *Vysokoskorostnoy zheleznodorozhnyy transport: sovremennye vyzovy i perspektivi razvitiya* [High-speed rail transport: current challenges and prospects]. *Zheleznodorozhnyy transport* – Railway transport. –2012. – No. 11. –P. 44-49.

16. Savvov V.M. *Obosnovanie parametrov tyagovogo elektrosnabzheniya i elektropodvizhnogo sostava vysokoskorostnykh zheleznodorozhnykh liniy v Rossii* [Substantiation of parameters of the traction power supply and electric rolling stock of high-speed railway lines in Russia]. *Diss. na sois. uch. st. k.t.n., spets.: 05.22.07 – podvizhnoy sostav tel. dorog, tyaga poezdov i elektrifikatsiya* – Diss. on SOEs. art PhD, spec.: 05.22.07 - rolling tel roads, traction of trains and electrification. – St. Petersburg, 2002. – P.136.

17. Kosarev A.B., Nazarov A. N. *Problemy razvitiya skorostnogo dvizheniya* [Problems of development of high-speed traffic]. *Materialy Vtorogo mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans`2003»* – Proceedings of the Second international Symposium, Eltrans`2003, St. Petersburg. –2003. – Page 42-54.

18. Marukin A. N. *Shemotekhnika sovremennykh tyagovykh podstanciy postojannogo toka i perspektivnye sistemy jelektrosnabzheniya* [The circuitry of modern traction substations DC current and future electricity system]. *Materialy mezhdunarodnogo simpoziuma «Eltrans-2001»* – Proceedings of the international Symposium "Eltrans`2001, St. Petersburg. –2002. P. 147-155.

19. Kotelnikov A. *Osnovnye trebovaniya k sistemam i ustrojstvam tyagovogo jelektrosnabzheniya skorostnykh i vysokoskorostnykh magistralej* [Basic requirements for systems and traction power supply devices and high-speed highways]. *6th International Conference “Modern Electric Traction in Inte-*

25. Панасенко, Н.В. Концепция силовых схем тяговых асинхронных электропередач магистральных электровазозов разных категорий и назначения для железных дорог Украины. / Н.В. Панасенко, Н.Н. Панасенко, В.Н. Панасенко // Вестник ВЭЛНИИ, Новочеркасск, ОАО «ВЭЛНИИ». –2008. –№3(52). –С.15-20.

26. Лашко, А.Д. Технічні вимоги до тягового рухомого складу нового покоління. / А.Д. Лашко, С.Г. Грищенко // Залізничний транспорт України. –2008. –№3. –С.11-14.

27. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод миттєвих потужностей; послідовне з'єднання елементів. / Т. М. Міщенко // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна – Д. : ДНУЗТ, 2012. – Вип. 41. – С.121 – 126.

28. Колодяжный, Н. В. Высокоскоростное пассажирское движение. – М.: Транспорт, 1967. – 415 с.

Надійшла до друку 15.05.2015.

grated XXIst Century Europe” – 6th International Conference “Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe”, Warszawa, Poland, -2003. -P. 35-41.

20. Bader M.P., Sichenko V.G. *Koncepcija obnovenija i perspektivy tehničeskogo razvitija sistem tjagovogo jel-ektrosnabzhenija* [The concept of renovation and perspectives technical development of traction power supply]. *Tehni-chna elektrodinamika. Temat. vip. Silova elektronika ta energoefektivnist'* – Technical electrodynamics. Theme. vol. Power electronics and energy efficiency. Part 2. -Kiev. -2009. -P. 88-93.

21. Mischenko T.M., Kiyko A.I. *Matematichne modelyuvannya perehidnih protsesiv v sistemi zminnogo strumu «tyagova mreza – elektrovoz» 1. Vmikannya silovogo transformatora elektrovoza v rezhimi holostogo hodu; otsinka parametriv* [Mathematical modeling of transients in the AC system with a traction chain - electric locomotive" 1. The inclusion of a power transformer locomotive idling; estimation of parameters]. *Visnyk DNUZT* – Bulletin of DNURT. - 2011. - Vol.36. P. 88-93.

22. *Spravochnik po elektro-snabzheniyu zheleznyh dorog* [Handbook of railway power supply]. Ed. K.G. Marquardt. - Moscow Transport, 1980. -256 p.

23. Sorin L.N., Yanov V.P. *Jelektrovozy novogo pokolenija i organizacija ih razrabotki* [A new generation of electric and organization development]. *Materialy Vtorogo mezhduarodnogo simpoziuma «Eltrans-2003»* – Proceedings of the Second International Symposium "Eltrans' 2003", St. Petersburg. - 2003. - P.115-122.

24. Sergienko M.I., Panasenکو N. In. *Osnovni vymogy i sxemotexnichni rishennya tyagovogo chastotno-regulovanogo elektropryvodu pasazhyrskykh elektrovozyv* [Basic requirements and circuit solutions traction frequency-controlled electric passenger locomotives]. *Zaliznychnyj transport Ukrainy* – The Railway transport of Ukraine. - 2009. - No. 5. P. 43-54.

25. Panasenکو N.V., Panasenکو N.N., Panasenکو V.N. *Koncepcija silovykh shem tjagovykh asinhronnykh jel-ektroperedach magistral'nykh jelektrovozov raznykh kategorij i naznachenija dlja zheleznyh dorog Ukrainy* [The concept of power circuits of traction power asynchronous electric locomotives of different categories and destination for the railways of Ukraine]. *Vestnik VJelNII* – Bulletin VELNII, Novocherkassk, JSC "VELNII." -2008. -№3 (52). -P.15-20.

26. Lasko A.D., Grishchenko S. G. *Tehnichni vimogy do tjagovogo ruhomogo skladu novogo pokolinnja* [Technical requirements for traction rolling stock of the new generation]. *Zaliznychnij transport Ukrainy* – The Railway transport of Ukraine. -2008. - No. 3. -P. 11-14.

27. Mischenko T.M. *Teoretichni aspekty ta metody identyfikacii parametriv pristroiv sistemi elektrichnoi tja-gi. Metod mittevykh potuzhnostej; poslidovne z'ednannja elementiv* [Theoretical aspects and methods of identification of parameters of devices of the electric traction system. The method of instant capacity; serial connection elements]. *Visnik DNUZT* – Bulletin of Dnepropetr. NAT. Univ Rail. Tr. Acad. V. Lazaryan - D : DNURT, 2012. - Vol. 41. P. 121 – 126

28. Kolodyazhny N.V. *Vysokoskorostnoe passazhirskoe dvizhenie* [High-speed passenger traffic]. - М.: Transport, 1967. - 415 p.

Внутрішній рецензент Костін М. О.

Зовнішній рецензент Випанасенко С. І.

© Міщенко Т. М., 2015

Впровадження швидкісного руху поїздів на залізницях України можливо лише після докладних досліджень електромагнітних і електроенергетичних процесів в пристроях системи тягового електропостачання. Останнє, в свою чергу, можливо лише методом моделювання, зокрема імітаційного, оскільки на сьогодні швидкісний рух поїздів в Україні відсутній і тому експериментальні дослідження неможливі.

Метою роботи було розробити в середовищі Matlab (Simulink) імітаційну модель електромагнітних процесів, що протікають в тяговій мережі змінного струму, при пакетному русі швидкісних поїздів, і шляхом моделювання визначити напругу на струмоприймачі електровоза, його струм, а також фідерний струм і втрати потужності в тяговій мережі при різних параметрах руху поїздів. Застосована методика імітаційного моделювання (в середовищі Matlab) поїздної ситуації на міжпідстанційній ділянці при різних варіантах кількості поїздів в пакеті і відстані між поїздами. Розрахована напруга на струмоприймачах електровозів в пакетах, їх струм, а також струм і втрати потужності на ділянках тягової мережі при пакетному русі швидкісних, зі швидкістю 200 км/год, поїздів. В розробленій імітаційній моделі процесів в системі тягового електропостачання вперше запропонована ідентифікаційна модель електрорухомого складу (електровозу) змінного струму. Вперше встановлено закономірності впливу кількості поїздів в пакеті, міжпідстанційної відстані та інтервалу часу попутного прямування поїздів на напругу на струмоприймачах, їх струми, а також на фідерний струм і витрати потужності в тяговій мережі.

Показано, що вимоги ПТЕ електрифікованих залізниць України за допустимим значенням рівня напруги на струмоприймачі електровоза при заданих умовах імітаційного моделювання виконуються. Підвищення втрат потужності в тяговій мережі при пакетному русі поїздів повинно враховуватися в склад і технологічних втрат, які входять в умовні втрати потужності.

Ключові слова: моделювання; пакети поїздів; швидкісний рух; тягова мережа; напруга; струм; електро-воз; тягова підстанція.

УДК 621.335.04 : 621.333

Т. Н. МИЩЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Електроснабжение железных дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел.: (099)136-96-25, ел. почта: mishchenko_tn@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6336-7350

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ ПРИ ПАКЕТНОМ ДВИЖЕНИИ СКОРОСТНЫХ ПОЕЗДОВ

Внедрение скоростного движения поездов на железных дорогах Украины возможно лишь после подробных исследований электромагнитных и электроэнергетических процессов в устройствах системы тягового электроснабжения. Последнее, в свою очередь, возможно только методом моделирования, в частности имитационного, поскольку на сегодня скоростное движение поездов в Украине отсутствует и поэтому экспериментальные исследования невозможны.

Целью работы было разработать в среде Matlab (Simulink) имитационную модель электромагнитных процессов, протекающих в тяговой сети переменного тока, при пакетном движении скоростных поездов, и путем моделирования определить напряжение на токоприемнике электровоза, его ток, а также фидерный ток и потери мощности в тяговой сети при различных параметрах движения поездов. Применена методика имитационного моделирования (в среде Matlab) поездажной ситуации на межподстанционном участке при различных вариантах количества поездов в пакете и расстояния между поездами. Рассчитано напряжение на токоприемниках электровозов в пакетах, их ток, а также ток и потери мощности на участках тяговой сети при пакетном движении скоростных, со скоростью 200 км/ч, поездов. В разработанной имитационной модели процессов в системе тягового электроснабжения впервые предложена идентификационная модель электроподвижного состава (электровоза) переменного тока. Впервые установлены закономерности влияния количества поездов в пакете, межподстанционного расстояния и интервала времени попутного следования поездов на напряжение на токоприемниках, их токи, а также на фидерный ток и потери мощности в тяговой сети.

Показано, что требования ПТЭ электрифицированных железных дорог Украины по допустимым значениям уровня напряжения на токоприемники электровоза при заданных условиях имитационного моделирования выполняются. Повышение потерь мощности в тяговой сети при пакетном движении поездов должно учитываться в состав технологических потерь, которые входят в условные потери мощности.

Ключевые слова: моделирование; пакеты поездов; скоростное движение; тяговая сеть; напряжение; ток; электровоз; тяговая подстанция.

Внутренний рецензент *Костин Н. А.*

Внешний рецензент *Вынанасенко С. И.*

UDC 621.335.04 : 621.333

T. M. MISHCHENKO (DNURT)

Department of Electric Power Supply of Railways, Dnepropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan st. 2, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49010,
tel.: +38(097)485-68-21, e-mail: mishchenko_tn@ukr.net, ORCID: orcid.org/0000-0001-6336-7350

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN TRACTION NETWORK WITH BATCH-SPEED TRAINS

The introduction of high-speed trains on the railways of Ukraine is possible only after detailed studies of electromagnetic and electric power processes in devices of traction power supply system. The latter, in its turn, is possible only by modeling, including imitative, because high-speed trains in Ukraine is missing and therefore experimental studies impossible.

The purpose of the work was to develop in Matlab (Simulink) imitative model of electromagnetic processes in traction AC in batch high-speed trains, and by modeling to determine the voltage at the pantograph of the locomotive, its current and feeder current and power loss in traction network for various parameters of trains. The technique of modeling (in Matlab) train situation at mipasiasync section in different variants, the number of trains in the package and the distance between trains. The calculated stress on scrumpymacs locomotives in packages, their current, as well as current and power loss sections traction network for batch movement speed, with a speed of 200 km/h trains. In developed simulation models of processes in the system traction power supply first proposed identification model electric rolling stock (locomotive) AC. For the first time the regularities of the influence of the number of trains in service, miptsteatte distance and time interval passing of trains on the voltage at scrumpymacs, their currents, and the feeder current and power loss in traction network.

It is shown that the requirements of PTE electrified Railways of Ukraine on valid input level voltage at the pantograph of the locomotive under the given conditions of the modeling are performed. The increase of power losses in traction network in packet trains should be taken into account in the composition and process losses, which are included in the contingent loss of power.

Keywords: modeling; packages trains; speed; power train; voltage; current; electric; traction substation.

Internal reviewer *Kostin M. O.*

External reviewer *Vypanasenko S. I.*