

При малій густині  $\frac{b}{t}=1,0$  збільшення кута ковзання від  $\varphi=0^\circ$  до  $\varphi=30^\circ$  приводить до зниження  $i_0$  (відповідно від  $\bar{i}=0,6$  до  $\bar{i}=0,52$ ). При  $\frac{b}{t}>1,5$  збільшення кута ковзання приводить до менш помітного прояву ефекту гістерезису:  $\bar{i}$  змінюється при збільшенні кута ковзання від 0,85 до 0,98. Як показали результати досліджень решіток, складених з профілів з різними кутами вигину середньої лінії ( $\theta_1=10^\circ$ ;  $\theta_2=20^\circ$ ;  $\theta_3=30^\circ$ ), збільшення кута вигину профілів однорядної решітки приводить до істотнішого прояву ефекту гістерезису при малій і великій густині, причому, це вплив найістотніше в решітках з малою густиною.

#### 4. Висновки

Загальний аналіз даних експериментальних досліджень показують, що при значеннях параметра нерозрахованості  $i>1,1-1,2$  у характеристиках типових

компресорних решіток виявляється ефект гістерезису (при квазістаціонарному обтіканні), що обумовлює зниження ефективності компресорних решіток при їх роботі в потоці, що має певну нерівномірність, на докритичних і критичних кутах атаки.

Таким чином проблема підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів і вдосконалення аеродинаміки їх проточної частини передбачає вирішення завдань про зниження впливу гістерезисних ефектів на характеристики вінців лопаток, що працюють в реальних умовах в періодично нерівномірному по колу потоці.

#### Література

1. Холщевников К.В. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1970.- 603 с.
2. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. – М.: Машиностроение, 1987.- 167 с.

УДК 612.331

## ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЯГОВИХ МЕРЕЖАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**В. Г. Сиченко**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,  
завідувач кафедри

Кафедра електропостачання залізниць  
Дніпропетровський національний університет інженерів  
залізничного транспорту ім. акад. В.А. Лазаряна  
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, Україна  
Контактний тел.: (0562) 33-19-11  
E-mail: elsnz@mail.ru

*Розглянуто методологію побудови імітаційної моделі для дослідження електромагнітних процесів електрифікованої ділянки постійного струму*

*Ключові слова: імітаційна модель, графік руху поїздів, моделювання міжпоїздних інтервалів, тяговий розрахунок, електричний розрахунок*

*Розглянуто методологію побудови імітаційної моделі для дослідження електромагнітних процесів електрифікованої ділянки постійного струму*

*Ключові слова: імітаційна модель, графік руху поїздів, моделювання міжпоїздних інтервалів, тяговий розрахунок, електричний розрахунок*

*Consider methodologies for constructing a simulation model for the study of electromagnetic processes electrified section of DC*

*Key words: simulation model, the schedule of trains, modeling of trains intervals, traction calculation, the electric account*

#### 1. Вступ

Система тягового електропостачання електрифікованої ділянки постійного струму (СТЕ) є сукупністю територіально розосереджених і працюючих паралельно електроенергетичних пунктів - тягових підстанцій, постів секціонування, пунктів паралельного з'єднання, пристроїв контактної мережі і ліній електропередачі між ними, об'єднаних спільністю цілей і призначена для переробки і передачі електроенергії необхідної

якості електрорухомому складу. Особливостями передачі електроенергії по тяговій мережі є зміна положення споживачів (ЕРС) і зміна режимів їх роботи, а також обмеження, що накладаються поїздами один на одного залежно від їх взаємного розташування. З точки зору забезпечення пропускну здатності електрифікованих залізниць основним показником якості енергообмінних процесів є рівень напруги на шині тягової підстанції і, отже, на струмоприймачах електровозів, який, проте, залежить не тільки від зміни

режимів роботи тягового навантаження, але і від зміни навантаження районних споживачів і живлячої енергосистеми, при цьому характер чинників, що впливають на напругу є нелінійним і нестационарним. З точки зору забезпечення безперебійності та безпеки руху поїздів необхідне також дотримання прийнятних рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) на всіх етапах споживання електричної енергії при взаємодії підсистем різного енергетичного рівня [1].

Таким чином, СТЕ з позицій технічної кібернетики - це багатовимірний об'єкт автоматичного управління, що характеризується стохастичним характером зміни параметрів функціонування, змінними станами якого є напруги у вузлах, потоки активної і реактивної потужностей, струми, що протікають по фідерах та рівні ЕМС, збуреннями - навантаження у вузлах (тяговий струм підстанції, струм районних споживачів), а керівними діями - сигнали управління, що подаються на пристрої керування обладнанням СТЕ. Для дослідження таких складних об'єктів широко застосовується математичне моделювання [2, 3].

Метою цієї роботи є розробка імітаційної моделі для дослідження електромагнітних процесів перетворення та споживання електричної енергії у тяговій мережі постійного струму.

## 2. Загальні положення

У технічних застосуваннях найбільш корисними і вживаними є математичні моделі, що відображають за допомогою систем рівнянь істотні риси реальних технічних об'єктів. Одним з важливих застосувань моделей у практичному аспекті є прогнозування поведінки об'єктів які моделюються. Застосування моделей дозволяє проводити контрольовані експерименти в ситуаціях, де експериментування на реальних об'єктах неможливе або економічно недоцільне. Експериментування із системою звичайно складається у варіюванні деяких її параметрів. При цьому, підтримуючи інші параметри незмінними, спостерігають за результатами експерименту. Для більшості систем це практично недоступно або занадто дорого. Звідси, коли проводити експеримент на реальній системі неможливо, створюється модель, на якій необхідні експерименти можуть бути проведені з відносною легкістю і невеликими витратами. При експериментуванні з моделлю складної системи можна більше довідатися про її внутрішні взаємодіючі фактори, чим при маніпулюванні з реальною системою. Це стає можливим завдяки меншому числу і доступності структурних елементів моделі.

Під моделюванням звичайно розуміють процес створення і використання деякої моделі. Математичне моделювання використовує кілька груп моделей, серед яких виділяють статичні і динамічні [2]. Динамічні моделі дозволяють відслідковувати поведінку оригіналу в часі, тому таке моделювання називають імітаційним. Ця назва дозволяє підкреслити важливу властивість моделі відображати розвиток процесів оригіналу в часі, що важливо, зокрема, при аналізі поведінки систем тягового електропостачання при русі поїздів (ЕРС), створюючих змінні навантаження. Крім того, традиційно в динамічному моделюванні

припускають наявність підсистеми оптимального керування, що не завжди має місце в імітаційному моделюванні СТЕ.

## 3. Викладення основного матеріалу

Система електропостачання залізниці складається з підсистем тягового і зовнішнього електропостачання, підсистем для забезпечення електроенергією нетягових і нетранспортних споживачів, а також ЕРС. При моделюванні СТЕ залізниць в якості елементів розглядаються силові та перетворювальні трансформатори, перетворювачі, ділянки контактної та рейкової мережі, повітряні і кабельні лінії електропередачі, електрорухомий склад (ЕРС). Специфіка моделювання цих елементів у їх електромагнітній взаємодії й визначає особливості імітаційної моделі СТЕ.

Завдання розрахунку різних режимів роботи електрифікованої дільниці для оцінки ЕМС СТЕ вкрай актуальні при проектуванні і експлуатації для виконання умови забезпечення безпеки руху. Ці завдання, розв'язувані на основі методів імітаційного моделювання, включають наступні етапи:

- формування та моделювання графіка руху поїздів;
- формування миттєвих схем на основі електричних з'єднань елементів СТЕ і визначення струморозподілу для кожної з них;
- вибірки даних миттєвих схем і формування інтегральних розрахункових показників.

Метою таких розрахунків є визначення споживання електричної енергії при русі поїздів і втрат її в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання, контроль напруги на струмоприймачі електровоза, струмів в елементах СТЕ та рівнів ЕМС у взаємодіючих системах. З точки зору забезпечення ЕМС нас цікавлять рівні гармонік та їх розподіл по довжині плеча живлення.

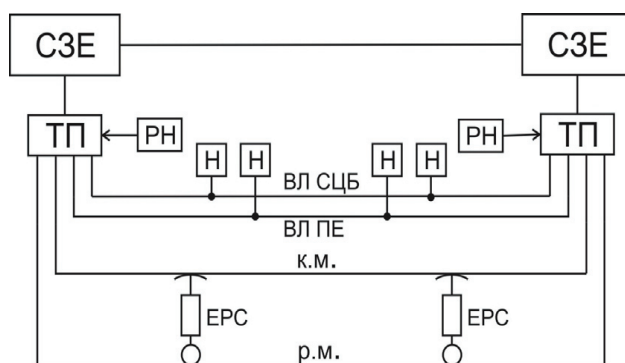


Рис. 1. Узагальнена структура імітаційної моделі СТЕ:  
СЗЕ — система зовнішнього електропостачання; ТП — тягова підстанція; РН — районне навантаження; Н — навантаження ліній електроживлення, к.м. — контактна мережа; р.м. — рейкова мережа; ЕРС — електрорухомий склад

Система електропостачання електрифікованої залізниці постійного струму може бути розділена на наступні підсистеми (рис. 1):

- система зовнішнього електропостачання;

- система тягового електропостачання;
- районне навантаження;
- лінії живлення автоблокування і повздовжнього електропостачання напругою (6) 10 кВ (ВЛ ПЕ і СЦБ);
- електрорухомий склад.

При цьому кожна з підсистем має свої структурні складові, які можна моделювати. Наприклад, на рис. 2 наведено структурну схему тягової підстанції.

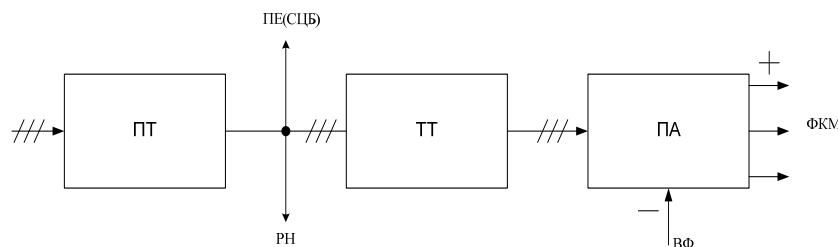


Рис. 2. Структурна схема тягової підстанції постійного струму:  
 ПТ – понижуючий трансформатор; ТТ – тяговий трансформатор;  
 ПА – перетворювальний агрегат; ФКМ – фідери контактної мережі;  
 ВФ – відсмоктувальний фідер

Загальним завданням імітаційного моделювання є визначення змін у часі параметрів режиму розглядуваної електричної системи. Розрахунки режимів об'єднаних систем тягового і зовнішнього електропостачання проводяться шляхом послідовного визначення режимів ряду миттєвих схем, що утворюються при русі поїздів.

Першим кроком імітаційного моделювання є підготовка розрахункової схеми, яка поєднує всі необхідні конкретним завданням підсистеми. На базі цієї розрахункової схеми формуються миттєві схеми з урахуванням поточного положення поїздів і величин тягових навантажень.

Для формування миттєвої схеми потрібна наступна інформація:

- схема з'єднань стаціонарних елементів з даними про їхні параметри;
- положення електротягових навантажень у розглядуваний момент часу, обумовлене графіком руху поїздів;
- навантаження, створювані поїздами в розглядуваний момент часу.

Вхідна інформація формується на використанні наступних джерел:

1. Електричні схеми зовнішнього і тягового електропостачання та параметрів і електричних характеристик їх інфраструктури.
2. Відомості про навантаження нетягових і нетранспортних споживачів.
3. Відомості про генеруючі вузли.
4. Графік руху поїздів (розміри руху) по розрахунковій ділянці. Графік руху повинен визначати маси поїздів, типи електровозів і дільничні швидкості руху. По цій інформації формуються миттєві тягові навантаження.
5. Результати тягових розрахунків.

Будь-яка математична модель ділянки електрифікованої залізниці припускає моделювання графіка руху поїздів, яке є моделюванням черговості

відправлення поїздів різних типів і моделювання інтервалів між ними з імовірнісної точки зору [4-7]. Моделювання типу поїзда, що знов відправляється, здійснюється за допомогою генератора випадкових чисел. При цьому відрізок числової осі від 0 до 1 розбивається на  $n$  частин, пропорційних числу поїздів кожного типу  $i$ , залежно від того, на який відрізок потрапило випадкове число, призначається тип поїзда. Формування матриці типів поїздів здійснюється

таким чином, що тип поїзда, що знов відправляється, формується перед випуском його на ділянку. Це дозволяє зменшити розмір матриці типів поїздів і відповідно, збільшити об'єм оперативної пам'яті. Програмою моделювання передбачений контроль числа відправлених поїздів по типам. При відправленні останнього поїзда зі всієї сукупності поїздів для даної колії формування миттєвих схем по ній припиняється. В зв'язку з цим необхідно відзначити, що відправлення поїздів по кожній колії проводиться незалежно. Для характеристики руху поїздів вико-

ристовуються наступні основні показники: інтенсивність руху, щільність потоку поїздів, швидкість руху, тривалість затримок поїздів [8, 9]. Відомо, що не існує якої-небудь закономірності розподілу поїздів по годинах доби [8, 10, 11, 12]. Нерівномірність інтенсивності руху поїздів пояснюється багатьма факторами. До об'єктивних причин можна віднести профіль колії, розходження тягових характеристик різних типів локомотивів, відстань між станціями і т.і. Суб'єктивними причинами є різна кваліфікація машиністів, розходження в характеристиках локомотивів однієї серії, погодні умови.

Найбільш істотними зовнішніми істотними причинами є коливання інтервалів готовності вантажних поїздів на станціях, нерівномірність прокладки на графіку пасажирських поїздів протягом доби, "вікна" для виконання ремонтно-колійних робіт [8]. Зміна співвідношення частки поїздів різних типів теж впливає на інтенсивність руху і, отже, міжпоїздний інтервал. Необхідно також відзначити вплив на інтенсивність руху різниці дільничної швидкості між поїздами різних типів. Всі разом причини нерівномірності інтенсивності руху визначають одну з властивостей потоку поїздів - його невизначеність. Зміна положення поїздів при русі по ділянці є стохастичним процесом, неідентичним у просторі і часі. Виходячи із суб'єктивної оцінки умов руху, кожний машиніст вибирає різний режим ведення поїзда, тому потяги в потоці слідуєть із різними швидкостями і на різних відстанях один від одного (вони також визначаються типом поїзда та розташуванням пристроїв АБ), тобто швидкості поїздів і часові інтервали між ними є випадковими величинами. Таким чином, рух поїздів при регулярній детермінованій основі, обумовлений графіком руху поїздів, по своїй фізичній природі - процес імовірнісний.

Вичерпною характеристикою випадкової величини є закон її розподілу [11, 13-15]. Практичне його значення полягає в тому, що закон розподілу показує

як часто зустрічаються різні значення випадкової величини, який характер її зміни і у яких межах вона змінюється.

До теперішнього часу не існує єдиного підходу при ви використуванні законів розподілу випадкових величин для визначення щільності розподілу імовірності інтервалів (щ.р.і.) між поїздами [10-12]. На підставі обробки статистичного матеріалу дослідники пропонують застосовувати різні закони розподілу: експоненціальний закон, розподіл Вейбулла, гіпергеометричний розподіл, суму експоненціальних розподілів. Ці закони розглядаються або для одного типу поїзда, або вся сукупність типів поїздів замінена трьома типами і, у припущенні, що число поїздів кожного типу досить велике, при розрахунку ймовірностей виходять зі схеми “вибірка з поверненням” [16]. З метою одержання більш точних оцінок розрахункових величин необхідно розглядати всі типи поїздів, а для розрахунку ймовірностей застосовувати схему “вибірка без повернення”, що більше відповідає дійсності, оскільки число поїздів різних типів, що відправляється за розрахунковий період завжди має кінцеве значення [17]. У теорії організації руху поїздів [9] прийнятий розподіл поїздів на шість категорій: далекі пасажирські поїзди, що мають швидкість більше 140 км/ год; інші далекі поїзди; приміські; прискорені вантажні; наскрізні вантажні поїзди і збірні. Розмаїтість типів поїздів незмірно вища: наприклад, вантажні великогабові, рефрижераторні і т.д. Загальне число поїздів, яких необхідно відправити за розрахунковий період

$$N = \sum_{i=1}^m N_i \quad (1)$$

де  $N_m$  - число поїздів  $m$ -ого типу.

Кожний тип поїзда можна охарактеризувати ймовірністю його появи на ділянці  $P_m$  і величиною середнього міжпоїздного інтервалу  $\theta_m$ . Таким чином, (щ.р.і.) різнотипного потоку поїздів з параметрами

$$m, P_1, P_2, \dots, P_m, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m \quad (2)$$

де  $\sum_{i=1}^m P_i = 1$  описується [13, 16] наступною функцією:

$$f(\tau) = \sum_{k=1}^n P_k \cdot e^{-(\tau - \theta_k) / \theta_k}, \quad \tau \geq 0 \quad (3)$$

яка представляє суміш випадкових величин. Ймовірнісний простір, описуваний (9), представляє багатомірний гіпергеометричний розподіл [14]:

$$P(B_1, \dots, B_n) = \frac{C_{N_1}^n \dots C_{N_n}^n}{C_N^n} \quad (4)$$

де  $N$  - число всіх поїздів

$N_m$  - число всіх поїздів  $m$ -ого типу

$n_m$  - число відправлених поїздів  $m$ -ого типу

Необхідно відзначити, що в даному розподілі при схемі випадкового вибору, що має місце й у нашому завданні, події незалежні [14], тобто поява поїзда першого типу, наприклад, на  $i$ -ому кроці буде визначатися тільки тим, скільки поїздів даного типу вже відправлено [15]

$$P(\text{тип}_i) = \frac{N_i - n_i}{N - i} \quad (5)$$

де  $N_1$  - число всіх поїздів 1-ого типу

$n_1$  - число відправлених поїздів 1-ого типу.

Міжпоїздний же інтервал між відправленим і відправленим знову поїздами залежить від типів цих поїздів. Для визначення  $\theta_k$  і  $\nu_k$  застосовується прийнята в [12] класифікація міжпоїздних інтервалів по групах, а саме:

- інтервали між двома вантажними поїздами;
- інтервали між двома пасажирськими поїздами;
- інтервали між вантажними й пасажирськими поїздами.

Таким чином, на кожному кроці і після розрахунку всіх ймовірностей, користуючись методом суперпозиції по  $J_1$  визначають тип поїзда, що відправляється, а по  $J_2$  - міжпоїздний інтервал. Блок-схема моделювання графіка руху поїздів наведена на рис. 3.

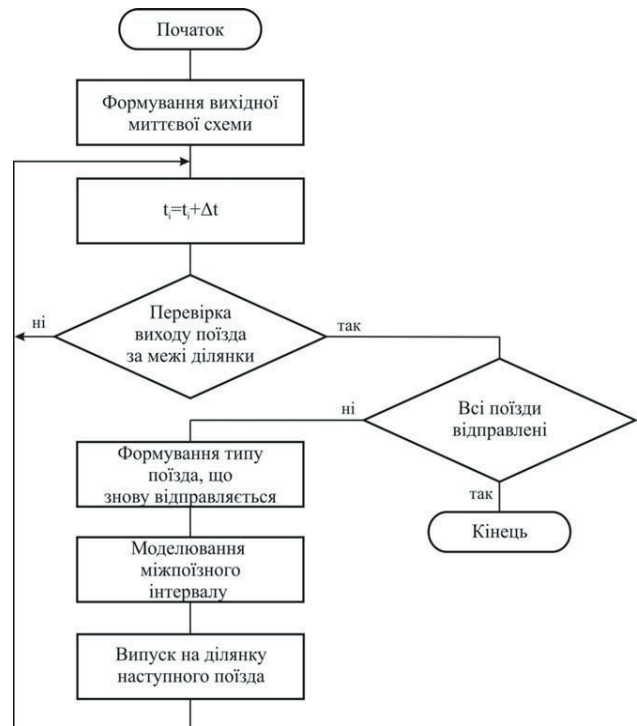


Рис. 3. Алгоритм моделювання графіка руху поїздів

Моделювання тягового навантаження, тобто навантаження від поїздів (ЕРС), що рухаються по ділянці, може здійснюватися різними способами, які можна віднести до двох груп:

- моделювання тягового навантаження вектором задаючих струмів;
- моделювання тягового навантаження вектором механічних потужностей.

При моделюванні тягового навантаження вектором механічних потужностей електромеханічна система розділяється по ободу колеса тягового приводу ЕРС на механічну і електричну частини, кожна з яких аналізується окремо [18]. У цьому випадку для аналізу механічної частини використовуються дані дослідних поїздок. Отримані при цьому характеристики механічної потужності використовуються в якості вихідних

даних для розрахунку електричної частини системи. При такому підході електровоз замінюється нелінійним опором, величина якого, однак, не враховує зміну профілю колії. У силу цього, даний метод не може використовуватися для розрахунку точних оцінок електричних величин.

При моделюванні тягового навантаження вектором струмів, кожний електровоз замінюється функцією струму  $J(s)$ , отриманою з тягового розрахунку. Такий підхід дозволяє враховувати реальні умови руху (профіль, вплив інших поїздів) [19]. Тяговий розрахунок відповідно до Правил тягових розрахунків для поїздної роботи [20], крім випадків обмежень швидкості руху по колії та обмежень по нагріванню тягових двигунів, повинен виконуватися за умови максимального використання сили тяги електровозом. Звичайно тяговий розрахунок розглядає поїзд як відособлену одиницю. Однак на ділянці одночасно перебувають кілька поїздів різного типу і ваги, які при використанні принципу максимуму фактично будуть зближатися, при цьому технічна швидкість руху по ділянці буде знижуватися особливо зі збільшенням насиченості ділянки поїздами. Поки що у теорії тяги не розроблено методику розрахунку потоку поїздів, коли поряд із профілем і тяговими характеристиками необхідно враховувати поїздно ситуацію. У зв'язку із цим фахівцями пропонується виконувати тяговий розрахунок так, щоб проїхати ділянку за заданий час. При цьому час ходу задають через технічні швидкості, які можна одержати або з режимних карт або виконавши аналіз виконаних графіків руху поїздів.

Рух поїзда по ділянці описується системою диференціальних рівнянь, яка у загальному вигляді для будь-якого режиму роботи електровоза має вигляд [19]

$$\begin{cases} d\vartheta / dt = \xi \cdot [f_k(\vartheta) - \omega_0(\vartheta) + i_k(S) - b_m(\vartheta)] \\ dS / dt = \vartheta \end{cases} \quad (6)$$

де  $\xi$  - перевідний коефіцієнт;  
 $\vartheta$  - швидкість руху;  
 $f_k$  - питома прискорювальна сила;  
 $i_k$  - питомий опір від ухилів колії;  
 $b_m$  - питома гальмівна сила;  
 $\omega_0$  - основний питомий опір руху;  
 $t$  - час;  
 $S$  - відстань.

Завдання полягає у знаходженні такої послідовності режимів роботи електровоза, щоб при заданому часі ходу забезпечувалась найменша витрата енергії на ділянці колії [19]. Вирішення цього завдання варто шукати при урахуванні обмежень на швидкість руху поїзда по колії і керуючу силу. При прямуванні поїзда по ділянці можливі наступні режими роботи електровоза:

- режим тяги (розгін і рух на автоматичних позиціях);
- режим вибігу;
- режим гальмування (регульовальне або гальмування до зупинки).

У загальному випадку завдання вибору режиму полягає в тому, що маючи на початку  $j$ -ого елемента профілю (ЕП) швидкість  $\vartheta_j$ , необхідно вибрати режим

таким чином, щоб вести поїзд за графіком з урахуванням ухилу  $j$ -ого ( $j+1$ -ого) ЕП.

При виборі режиму приймається:

- якщо  $j$ -й ЕП - керівний підйом, то призначається режим тяги [19];
- якщо  $(j+1)$ -й ЕП - керівний підйом, то вибирається режим, що забезпечує наприкінці  $j$ -ого ЕП максимально можливу швидкість (з урахуванням обмежень);
- якщо  $(j+1)$ -й ЕП шкідливий спуск, то вибирається режим, що забезпечує наприкінці  $j$ -ого ЕП мінімальну швидкість;
- якщо  $(j+1)$ -й ЕП не керівний підйом і не шкідливий спуск, то вибирається режим, що забезпечує швидкість руху, максимально близьку до необхідної для прослідування дільниці за заданий час:

$$\vartheta_{j+1} = \frac{L - S_j}{t_{завд} - t_j} \quad (7)$$

де:  $S_j$  - координата віддалення поїзда від початку дільниці;

$t_j$  - час віддалення поїзда від початку дільниці;

$L$  - довжина дільниці.

Тут необхідно відзначити, що режими вибігу і гальмування не вибираються, а призначаються безпосередньо при реалізації тягового розрахунку відповідно до заданих координат зупинок і обмежень швидкостей.

На кожному кроці розрахунку перевіряється виконання умови:

$$v_{\gamma+1} \leq v_{\text{доп max}} \quad (8)$$

В результаті електромагнітних процесів споживання електричної енергії в ЕРС виникають електромагнітні завади, які можуть негативно впливати на роботу суміжних підсистем інфраструктури залізничного транспорту.

Сучасний стан розвитку комп'ютерної техніки та прогностичного забезпечення дозволяє об'єднати підходи до моделювання електротягового навантаження та враховувати взаємодію всіх підсистем ЕРС: механічну, електричну та керуючу, отримуючи при цьому більш точні оцінки електромагнітних процесів [21].

Методика формування миттєвих схем базується на поділі розрахункової електричної схеми на стаціонарну частину, що включає в себе зовнішнє електропостачання, знижуючі та тягові трансформатори, перетворювачі, і змінну частину, яка складається з елементів тягової мережі та електрорухомого складу. Для проведення електричного розрахунку миттєвих схем на сьогодні сформовано два основних підходи: аналітичний [10, 22] та матричний [23], який дозволяє не тільки спрощувати розрахунки складних електричних схем, а й збільшувати швидкодію розрахункового процесу [24].

Саме тому в даній імітаційній моделі застосовано матричний метод розрахунку миттєвих схем. Верхній частотний діапазон моделювання, у відповідності з установленною практикою [25], знаходиться на рівні 2 кГц.

Узагальнена схема імітаційної моделі наведена на рис. 4.

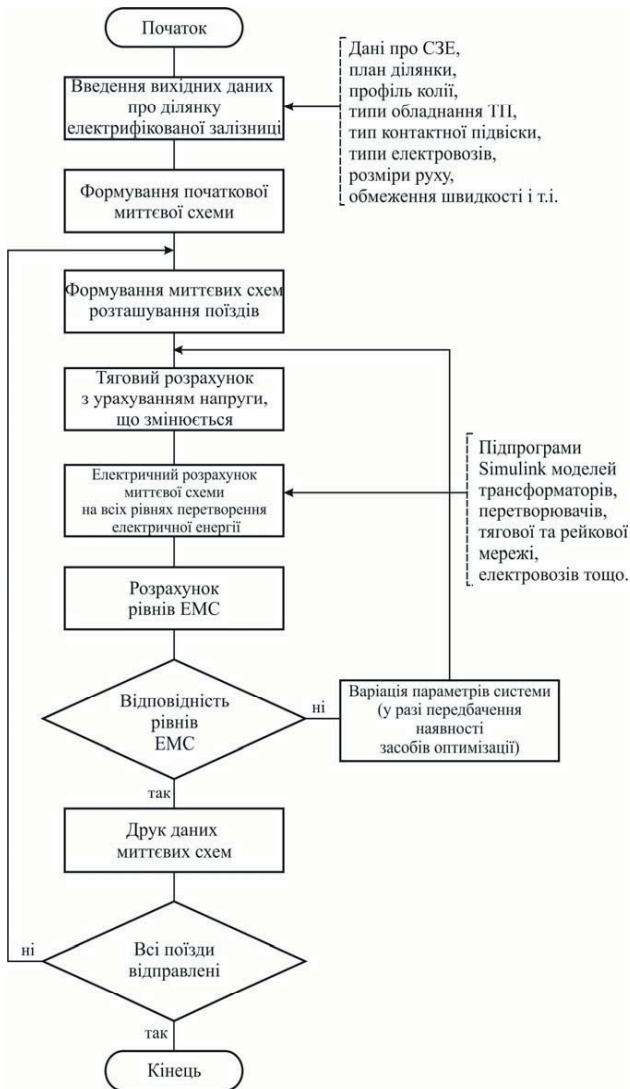


Рис. 4. Узагальнена схема імітаційної моделі

#### 4. Висновки

Розроблена імітаційна модель дозволяє комплексно оцінювати характер протікання електромагнітних процесів у тягових мережах постійного струму з визначенням їх енергетичних характеристик та рівнів електромагнітної сумісності на всіх етапах споживання електричної енергії.

#### Література

1. Сиченко, В.Г. Методологічні засади забезпечення електромагнітної сумісності електрифікованих ліній постійного струму [Текст] / В.Г. Сиченко // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 85-88.
2. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем. [Текст] / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
3. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. М.: Мир, 1978. – 304 с.

4. Марквардт, Г.Г. Вычислительная и микропроцессорная техника в устройствах электрических железных дорог [Текст] / Г.Г. Марквардт – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.
5. Почаевец, Э.С. Анализ режимов системы электроснабжения методами теории потоков случайных событий [Текст] / Э.С. Почаевец, Я.Е. Савич // Сб. научн. тр. РИИЖТ. – 1981. – Вып. 162.: Вопросы расчёта, технической диагностики и автоматического управления систем электроснабжения. – С. 67-71.
6. Тер-Оганов, Э.В. Имитационная модель работы системы электроснабжения двухпутного электрифицированного участка [Текст] / Э. В. Тер-Оганов // Сб. научн. тр. ВЗИИТ. – 1983. – Вып. 117.: Вопросы имитационного моделирования и диагностики электрифицированных железных дорог. – С. 58-61.
7. Марквардт, К.Г. О совершенствовании расчётов системы электроснабжения электрических железных дорог [Текст] / К.Г. Марквардт // Сб. науч. тр. МИИТ. – 1970. – Вып. 340: Вопросы энергоснабжения электрических железных дорог. – С. 3-12.
8. Левин, Д.Ю. Оптимизация потока поездов [Текст] / Д.Ю. Левин – М.: Транспорт, 1988. -175 с.
9. Каретников, А.Д. График движения поездов [Текст] / А.Д. Каретников, Н.А. Воробьёв – М.: Транспорт, 1989. -301 с.
10. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог [Текст] / К.Г. Марквардт – М.: Транспорт, 1982. -528 с.
11. Марквардт, Г.Г. Применение теории вероятностей и вычислительной техники в системе энергоснабжения [Текст] / Г.Г. Марквардт – М.: Транспорт, -224 с.
12. Мирошниченко, Р.И. Решение задач энергоснабжения на электронных машинах [Текст] / Р.И. Мирошниченко – М.: Транспорт, 1971. -168 с.
13. Справочник по теории вероятностей и математической статистике [Текст] / под ред. В.С. Королюка – Киев.: Наукова думка, 1985. - 640 с.
14. Ширяев, А.Н. Вероятность [Текст] / А.Н. Ширяев – М.: Наука, 1989. – 640 с.
15. Феллер, В. Введение в теорию вероятностей и её приложения [Текст] / В. Феллер – М.: Мир, 1984. - 528 с.
16. Марквардт, К.Г. Моделирование временных интервалов между поездами в имитационных моделях систем электроснабжения [Текст] / К.Г. Марквардт, А.А. Урнев // Сб. научн. тр. МИИТ. – 1990. - Вып. 831: Повышение эффективности тягового электроснабжения. – С. 19-28.
17. Урнев, А.А. Моделирование межпоездных интервалов в имитационных моделях электрифицированных железных дорог. Московский институт инженеров транспорта [Текст] / А.А. Урнев, В.Г. Сыченко // Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 06.05.91 – № 5510-жд – 10 с.
18. Почаевец, Э.С. Анализ режимов системы электрической тяги при фиксированной выходной мощности [Текст] / Э.С. Почаевец // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1979. - №1. – с. 133-140.
19. Розенфельд, В.Е. Теория электрической тяги [Текст] / Розенфельд, В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

20. Правила тяговых расчетов для поездной работы [Текст] – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.: ил., табл.
21. Сиченко, В. Г. Моделивання електротягового навантаження у задачах електромагнітної сумісності електрифікованих залізниць постійного струму. [Текст] / В.Г. Сиченко, Є.М. Гайсьонюк //Технічна електродинаміка, Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність – 2010. – Ч. 2 – с. 185-188.
22. Математическое моделирование динамики электровозов. / [Текст] под ред. Никитенко А.Г. М. – М.: Высшая школа. 1998.- 274 с.
23. Мельников, Н. А. Матричный метод анализа электрических цепей [Текст] / Н. А. Мельников. – М. – Л.: Энергия, 1966. – 216 с.
24. Босий, Д. О. Імітаційне моделювання системи тягового електропостачання для дослідження показників якості електричної енергії на тягових підстанціях змінного струму [Текст] / Д. О. Босий. //Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізнич. трансп – 2008. – Вип. 24– С. 49-54.
25. Уильямс, Т. ЭМС для разработчиков продукции [Текст] / Т. Уильямс – М.: Издательский дом Технологии, 2003. – 540 с.

*Запропоновано комплексне управління теплонасосним енергопостачанням на основі інформації як міри відтворення співвідношення виробництва та споживання енергії в єдиному інформаційному просторі*

*Ключові слова: синергетичний принцип, експертна система, управління на рівні прийняття рішень*

*Предложено комплексное управление теплонасосным энергообеспечением на основе информации как меры отражения соотношения производства и потребления энергии в едином информационном пространстве*

*Ключевые слова: синергетический принцип, экспертная система, управление на уровне принятия решений*

*Complex control provision by energy with heat pump on base of information as measure of the reflection of production and consumptions of the energy in correlation in united information*

*Keywords: synergetic principle, expert system, control on decision-making level*

УДК 621.182.2.001.57

## КОМПЛЕКСНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЕПЛОНАСОСНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Є.Є. Чайковська

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент\*

Контактний тел.: (048) 758-47-67

E-mail: eechaikovskaya@list.ru

В.В. Стефанюк

Аспірант\*

Контактний тел.: 097-659-30-65

E-mail: vadimstefanyuk@gmail.com

\*Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики

Одеський національний політехнічний університет пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

### 1. Вступ

В результаті інтегрованого інтелектуального управління теплонасосним енергопостачанням запропоновано узгоджувати рівень споживання теплоти з рівнем продуктивності теплового насоса на основі експертної системи, основою якої є динамічні підсистеми – випарник та конденсатор [1-3].

### 2. Постановка задачі

Комплексна підтримка функціонування теплонасосного енергопостачання потребує додаткової інформації щодо зміни витрати пари холодагента через компресор з ціллю зміни його потужності в умовах не

постійної температури низькопотенційного джерела енергії. Використання сигналу за зміною витрати пари холодагента в традиційних системах управління не можливо у зв'язку із коливальним характером зміни витрати пари.

### 3. Рішення задачі

З цією ціллю запропоновано розширити реалізовану експертну систему за рахунок нової динамічної підсистеми – компресора теплового насоса. Отримано нову передатну функцію за каналом: «витрата пари холодагента – тиск пари холодагента». Передатні функції за каналами: «температура місцевої води – витрата пари холодагента» для конденсатора теплового насоса,