

УДК 621: 331.3.024: 621

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.169.2017.111092>

## ДО ПИТАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ БЕЗПЕРЕБІЙНОГО ЖИВЛЕННЯ НА ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЯХ ПРИ ШВИДКІСНОМУ РУСІ

Канд. техн. наук О. Д. Супрун, асист. Ю. О. Семененко, О. В. Ушаков

## К ВОПРОСУ ВНЕДРЕНИЯ ИСТОЧНИКА БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ НА ТЯГОВИХ ПОДСТАНЦИЯХ ПРИ СКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ

Канд. техн. наук А. Д. Супрун, ассист. Ю. А. Семененко, А. В. Ушаков

## TO THE QUESTION OF INTRODUCTION OF SOURCE OF UNINTERRUPTED FEEDING ON RAIN SUBSTANCES AT A SPEED MOTION

Ph.D., associate professor O. D. Suprun, assistant Y. O. Semenenko, O. V. Uschakov

*Кардинальне вирішення завдання забезпечення якості електричної енергії полягає у зміні структури системи живлення власних потреб і резервного електропостачання шляхом використання в її складі розробленого агрегату безперебійного живлення, що використовує поєднання функції резервного джерела з функцією установки гарантованого живлення.*

*Розроблена методика проектування враховує особливості суміщених електричних машин і дозволяє визначити параметри магнітопроводу, розрахувати сумарні електромагнітні навантаження, вибрати схему з'єднання обмоток, розрахувати магнітний ланцюг, розрахувати параметри суміщеної машини, провести розрахунок електродинамічних зусиль і перевірку на можливість виникнення вібрацій, а також вибрати інерційну постійну.*

*Отримані закони роботи розробленого регулятора напруги у двигунному і генераторному режимах роботи забезпечують стабілізацію напруги на шинах гарантованого живлення.*

**Ключові слова:** система електропостачання, резервне джерело, критерій подібності, регулятор напруги, суміщена електрична машина.

*Кардинальное решение задачи обеспечения качества электрической энергии состоит в изменении структуры системы питания собственных нужд и резервного электроснабжения путем использования в ее составе разработанного агрегата бесперебойного питания, использующего совмещение функции резервного источника с функцией установки гарантированного питания.*

*Разработанная методика проектирования учитывает особенности совмещенных электрических машин и позволяет определить параметры магнитопровода, рассчитать суммарные электромагнитные нагрузки, выбрать схему соединения обмоток, рассчитать магнитную цепь, рассчитать параметры совмещенной машины, провести расчет электродинамических усилий и проверку на возможность возникновения вибраций, а также выбрать инерционную постоянную.*

*Полученные законы работы разработанного регулятора напряжения в двигательном и генераторном режимах работы обеспечивают стабилизацию напряжения на шинах гарантированного питания.*

**Ключевые слова:** система электроснабжения, резервный источник, критерий подобия, регулятор напряжения, совмещенная электрическая машина.

*A cardinal solution to the problem of ensuring the quality of electrical energy is to change the structure of the power supply system for own needs and backup power supply by using in its composition a developed unit for uninterruptible power supply using the combination of a reserve source function with the function of setting a guaranteed power supply.*

*The developed design methodology takes into account the features of the combined electric machines and allows to determine the parameters of the magnetic circuit, calculate the total electromagnetic loads, select the winding connection, calculate the magnetic circuit, calculate the parameters of the combined machine, calculate the electrodynamic forces and check for the possibility of vibrations, and select the inertial constant.*

*When developing the design methodology for autonomous power supply systems, the similarity theory methods were used, based on the use of similarity theorems and elements of dimensional theory. In addition, when developing the design methodology of the converter, methods for solving optimization problems and elements of the theory of automatic control were used.*

*The design method differs from the known ones in that it provides for the optimization of electromagnetic and linear loads of electrical machines, their verification for vibration, and also provides recommendations on the choice of voltage regulators for the motor and generator of the converter operating in synchronous-synchronous mode.*

**Keywords:** power supply system, reserve source, similarity criterion, voltage regulator, combined electric machine.

**Вступ.** Впровадження на тягових підстанціях блочно-модульних новітніх технологій при швидкісному русі спричиняє збільшення кількості одиничної й сумарної встановленої потужності відповідальних електроприймачів, нормальна робота яких може бути забезпечена тільки в умовах гарантованого безперебійного живлення. Підвищення вимог електроприймачів до надійності та якості електроживлення зажадали у процесі розроблення систем автоматизованого управління системами електричної тяги вирішення питання безперебійного живлення [1-3]. Одночасно ускладнюються процеси перетворення енергії, розширюється різноманіття енергетичних установок та агрегатів, що забезпечують найбільш раціональні режими енергоживлення споживачів ВЛ СЦБ.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Існуючі на сьогодні системи автономного електропостачання [4, 5, 9, 11] не повністю задовольняють вимоги, що висуваються електроприймачами цих систем до якості електричної енергії. Обладнання, що використовується в системах автономного електропостачання,

виробило свій ресурс і потребує заміни. Звісно, що при модернізації існуючих систем необхідно врахувати й усунути всі недоліки, властиві відомим системам електропостачання, а при розробленні нових систем електропостачання застосувати нові технічні рішення і нові технології, що забезпечують виконання вимог з надійності і якості електропостачання. Науково-технічне завдання розроблення методики проектування для нових систем автономного електропостачання є актуальним завданням.

Існуючі для цього відомі пристрої [8-10] в аварійних режимах не забезпечують безперебійність електропостачання та показники якості електричної енергії. Науково-технічне завдання вдосконалення систем гарантованого живлення [4, 5], в основу яких покладено дизель-інерційні УГЖ на базі суміщеної електричної машини, спрямоване на досягнення необхідних показників якості електричної енергії в аварійних режимах роботи, є досить актуальною темою в сучасній електроенергетиці.

**Визначення мети та задачі.** Метою даного дослідження є обґрунтування

шляхів досягнення безперебійного електропостачання з необхідними показниками якості електричної енергії ВЛ СЦБ і споживачів власних потреб тягових підстанцій при швидкісному русі. Можливості вдосконалення таких систем ще не вичерпані і розглянуті в роботах [3-5].

#### Основна частина дослідження.

Запропонована установка [12] дозволяє, на відміну від відомих, забезпечити якість напруги, що потрібне на шинах живлення ВЛ СЦБ в динамічних режимах роботи

електричної машини при коливаннях і вимиканнях напруги мережевого вводу, а також при різних аномальних явищах у тяговій мережі за рахунок відсутності гальванічного зв'язку між мережею та шинами живлення ВЛ СЦБ. Система електроживлення ВЛ СЦБ (рис. 1) працює так. За наявності напруги на ввіді мережі електрична енергія від шин 10 кВ поступає через вимикач мережевого вводу на шини мережного вводу.

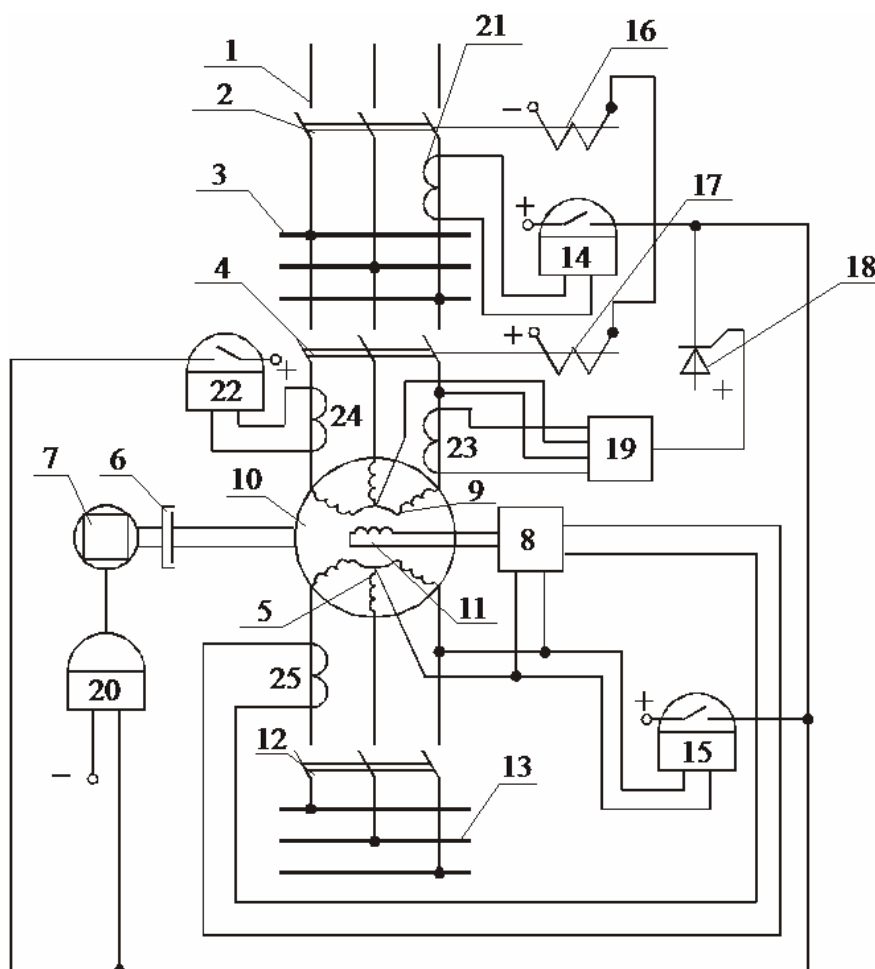


Рис. 1. Структурна схема резервного джерела

Перша статорна обмотка електричної машини отримує живлення від шин 10 кВ тягової підстанції і, працюючи у двигун-компенсаторному режимі, приводить до обертання ротор електричної машини 5.

Муфта 6 в цей час роз'єднана і приводний двигун дизеля 7 знаходиться в готовності до пуску (у режимі чергування). Друга статорна обмотка суміщеної електричної машини працює в генераторному режимі та

забезпечує електропостачання ВЛ СЦБ. Підтримка напруги на шинах ВЛ СЦБ в заданих границях здійснюється регулятором 8 збудження, у якості якого може бути застосований трансформатор фазового компаундування з коректором напруги.

Захист шин мережевого вводу від коротких замикань і перевантажень здійснюється першим реле 14 струму, спрацювання якого забезпечить вимкнення вимикача 2 мережевого вводу та першого вимикача 4 суміщеної електричної машини, а також ввімкнення через реле 20 пуску приводного двигуна дизеля 7, що забезпечує перехід системи в режим резервного електропостачання з приводом від двигуна внутрішнього згоряння.

Реле 15 частоти забезпечує переведення системи в режим резервного електропостачання при зниженні частоти напруги на шинах ВЛ СЦБ до значення, що визначається відповідною уставкою ( $\pm 1\%$ ). Спрацювання реле частоти відбувається у випадку, коли частота напруги живлячої мережі упала нижче допустимого значення, або при переході в режим резервного електропостачання при зникненні напруги на вводі мережі, у випадку відмови блока 19 виявлення режимів роботи, який повинен фіксувати переведення першої статорної обмотки в генератор-компенсаторний режим і забезпечення через тиристор 18 запуск приводного двигуна, вимкнення вимикача 2 мережевого вводу та першого вимикача 4 електричної машини. Захист шин ВЛ СЦБ здійснюється другим вимикачем 12 суміщеної електричної машини. Друге реле 22 струму забезпечує захист першої статорної обмотки електричної машини від перевантажень при великих відхиленнях живлячої напруги мережі. Необхідність у такому захисті може з'явитися, наприклад, у випадку, коли напруга мережевого вводу має значення, що дорівнює максимально допустимому за умови якості напруги, напруга на шинах живлення ВСЛ СЦБ

дорівнює номінальному значенню і навантаження цих шин дорівнює номінальному та носить активно-індуктивний характер. Захист також потрібен і в іншому крайньому випадку, коли значення напруги мережевого вводу дорівнює мінімально допустимому з умов якості напруги, напруга на шинах ВЛ СЦБ дорівнює номінальній та навантаження цих шин носить активно-ємнісний характер. В обох випадках може з'явитися перенапруга першої статорної обмотки реактивним струмом і для захисту цієї обмотки необхідно вимкнути мережевий ввід.

Для зменшення часу перехідного процесу від режиму чергування до режиму резервного живлення зараз знаходяться на стадії розроблення електричні машини з використанням роторів зі збільшеними масогабаритними показниками, які є за рахунок енергії, запасеної в них, стартерами для запуску дизеля.

Наявність у магнітопроводі суміщеної електричної машини потребує уточнення умов вибору електромагнітних навантажень, особливо в тій частині розрахунку, яка пов'язана з розподілом навантажень між обмотками. При цьому необхідно розрізняти два можливих варіанти виконання суміщеної електричної машини: на базі магнітопроводу серійного асинхронного двигуна (варіант використання базової електричної машини); на базі спеціальної геометрії магнітопроводу (варіант розроблення нової системи).

Під час розрахунку суміщеної електричної машини за першим варіантом, з використанням базової машини, яку виготовляють в умовах виробництва машин єдиних серій з використанням налагодженої технології, що оправдано економічно, при заданих основних розмірах необхідно визначити активну потужність, яка виробляється в машині. Під час розрахунку суміщеної електричної машини за другим варіантом потрібно визначити її основні розміри при заданих значеннях активної потужності. І в тому, і в іншому

варіанті розрахунку необхідно уявити основні параметри суміщених електричних машин. До таких параметрів належать: струм  $I$ , напруга  $U$ , потужність  $P$ , кількість витків обмотки  $w$ , частота  $f$ , індуктивність обмотки  $L$ , активний опір  $R$ , магнітна проникність речовини магнітопроводу  $\mu$ , маса  $M$ , деякий характерний розмір  $D$  (діаметр  $D$ , довжина  $l$ , повітряний зазор  $\delta$ ), температура  $\Theta$ , коефіцієнт тепловіддачі  $K_t$ , теплоємність  $C$ . Для встановлення зв'язків між основними параметрами використаємо елементи теорії розмірності. Введемо розмірності основних параметрів, що розглядаються в одиницях виміру довжини  $[L]$ , маси  $[M]$ , температури  $[\Theta]$ , сили струму  $[I]$ , часу  $[T]$ . Знайдемо серед цих розмірних величин основні, для яких визначник  $\Delta$  не буде дорівнювати нулю. У якості основних (незалежних) одиниць оберемо такі:  $I, f, \mu, \Theta, D$ . Тоді отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} [I] = [I]^1 \cdot [T]^0 \cdot [M]^0 \cdot [\Theta]^0 \cdot [D]^0; \\ [f] = [I]^0 \cdot [T]^{-1} \cdot [M]^0 \cdot [\Theta]^0 \cdot [D]^0; \\ [\mu] = [I]^0 \cdot [T]^{-2} \cdot [M]^1 \cdot [\Theta]^0 \cdot [D]^0; \\ [\Theta] = [I]^0 \cdot [T]^0 \cdot [M]^0 \cdot [\Theta]^{-1} \cdot [D]^0; \\ [D] = [I]^0 \cdot [T]^0 \cdot [M]^0 \cdot [\Theta]^0 \cdot [D]^1. \end{cases} \quad (1)$$

Системі рівнянь (1) відповідає такий визначник:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0. \quad (2)$$

Встановимо зв'язки параметрів суміщеної електричної машини з основними одиницями, тобто встановимо критерії подібності. Перший з них  $\pi_1$  отримаємо так:

$$\pi_1 = \frac{[D]^2 \cdot [M]^1 \cdot [T]^{-3} \cdot [I]^2}{[I]^{\alpha_1} \cdot [T]^{-\beta_1} \cdot [T]^{-2\gamma_1} \cdot [M]^{\gamma_1} \cdot [\Theta]^{\xi_1} \cdot [D]^{\varphi_1}}. \quad (3)$$

Прирівнюючи показники ступеня однойменних величин чисельника та знаменника, отримаємо, що  $\alpha_1 = 2$ ,  $\varphi_1 = 2$ ,  $\gamma_1 = 1$ ,  $\beta_1 = 1$ ,  $\xi_1 = 0$ . Так само будемо мати, що

$$\pi_1 = \frac{P}{I^2 \cdot f \cdot \mu \cdot D^2} = const. \quad (4)$$

Вводячи поняття лінійного навантаження електричної машини  $A = I/l$  та виходячи з того, що величину індукції  $B$  можна представити як добуток магнітної проникності  $\mu$  і напруженості  $H$  і враховуючи другий закон Кірхгофа для магнітного кола, представимо перший критерій подібності як

$$D^2 \cdot l = \frac{P \cdot K}{A \cdot B \cdot f}, \quad (5)$$

де  $K$  – постійний коефіцієнт.

Фактично перший критерій подібності являє собою основне розрахункове рівняння електричної машини змінного струму:

$$D^2 \cdot l = \frac{8,6 \cdot 10^6 \cdot P}{K_{об} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot n}, \quad (6)$$

де  $K_{об}$  – обмотковий коефіцієнт;

$B_{\delta}$  – індукція в зазорі;

$n = 60 \cdot f / p$  – кількість обертів ротора;

$P$  – кількість пар полюсів.

При введенні другого критерію подібності  $\pi_2$  використаємо таке співвідношення:

$$\pi_2 = \frac{[D]^2 \cdot [M]^1 \cdot [T]^{-3} \cdot [I]}{[I]^{\alpha_2} \cdot [T]^{-\beta_2} \cdot [T]^{-2\gamma_2} \cdot [M]^{\gamma_2} \cdot [\Theta]^{\xi_2} \cdot [D]^{\varphi_2}}. \quad (7)$$

Із формули (7) випливає, що  $\alpha_2 = 1$ ,  $\varphi_2 = 2$ ,  $\gamma_2 = 1$ ,  $\beta_2 = 1$ ,  $\xi_2 = 0$ .  
Формулу (7) приводимо до вигляду

$$\pi_2 = \frac{U}{I \cdot f \cdot \mu \cdot D^2}. \quad (8)$$

Третій критерій  $\pi_3$  визначається як

$$\pi_3 = \frac{[L]}{[I]^{\alpha_3} \cdot [f]^{\beta_3} \cdot [\mu]^{\gamma_3} \cdot [\Theta]^{\xi_3} \cdot [D]^{\varphi_3}} = \frac{L \cdot I^2}{\mu \cdot D^2}. \quad (9)$$

Для четвертого  $\pi_4$ , п'ятого  $\pi_5$ , шостого  $\pi_6$  критеріїв отримаємо

$$\pi_4 = \frac{[R]}{[I]^{\alpha_4} \cdot [f]^{\beta_4} \cdot [\mu]^{\gamma_4} \cdot [\Theta]^{\xi_4} \cdot [D]^{\varphi_4}} = \frac{R \cdot I^2}{f \cdot \mu \cdot D^2}. \quad (10)$$

$$\pi_5 = \frac{[K_T]}{[I]^{\alpha_5} \cdot [f]^{\beta_5} \cdot [\mu]^{\gamma_5} \cdot [\Theta]^{\xi_5} \cdot [D]^{\varphi_5}} = \frac{K_T \cdot \Theta}{f \cdot \mu}. \quad (11)$$

$$\pi_6 = \frac{[C]}{[I]^{\alpha_6} \cdot [f]^{\beta_6} \cdot [\mu]^{\gamma_6} \cdot [\Theta]^{\xi_6} \cdot [D]^{\varphi_6}} = \frac{C \cdot \Theta}{f^2 \cdot D^2}. \quad (12)$$

Проаналізуємо отримані співвідношення (7) – (12). Критерій  $\pi_2$  фактично визначає ЕРС, що отримується від одного витка статорної обмотки при заданих розмірах статора і тим самим визначає необхідну кількість витків статорної обмотки. Критерій  $\pi_3$  встановлює величину втрат у сталі, а критерій  $\pi_4$  визначає величину втрат у міді. Критерій  $\pi_5$  визначає кількість тепла, що передається в навколишнє середовище з одиниці площі, і тим самим визначає вимоги, що висуваються до системи відведення тепла. Критерій  $\pi_6$  встановлює кількість тепла, що іде на нагрів обмоток, і визначає вимоги, що висуваються до ізоляції. Знайдені критерії дозволяють здійснити вибір електромагнітних навантажень запропонованого перетворювача частоти.

Розрахунок суміщеної електричної машини ведеться в такій послідовності:

1. Вибір базової електричної машини проводиться з урахуванням рекомендацій, викладених у підрозділах [3], при цьому визначаються параметри магнітопроводу, що забезпечують утворення необхідних електромагнітних полів «двигуна» та «генератора», розраховуються сумарні електромагнітні навантаження, попередні значення електромагнітних навантажень «двигуна» та «генератора», потужність перетворювача в габариті базової машини.

2. Вибір схеми з'єднання обмоток статора та ротора. Розглядаються варіанти виконання обмоток: роздільної та суміщеної, що забезпечують взаємну компенсацію в обмотках впливу електрорушійних сил, що створюються

різнополюсними магнітними полями, які обертаються. Вираховуються обмоткові коефіцієнти. За результатами розрахунків електромагнітних навантажень визначаються кількість витків і переріз провідників обмотки. За формулами, які використовуються при розрахунку звичайних машин змінного струму, визначаються активні та індуктивні опори обмоток «двигуна» та «генератора».

3. Розрахунок магнітного кола. Використовуються розрахункові формули, які застосовуються для звичайних машин змінного струму. Розрахунок проводиться окремо для генератора та двигуна. Особливість розрахунку полягає в тому, що значення сумарної індукції в зазорі  $B_{\delta}$  повинно бути збільшено в  $1,2 \div 1,4$  разу порівняно з індукцією в зазорі базової електричної машини. Це пов'язано з тим, що звичайно значення індукції в повітряному зазорі визначає об'єм сталі на одиницю енергії, необхідної на намагнічування магнітопроводу. В одномашинній системі «двигун – генератор» ця енергія поступає від двох різнополюсних полів. Виходячи з умови рівності середніх щільностей потоків енергії базової та суміщеної машин

$$F_{\delta} \cdot B_{\delta\delta} = F_{\delta} \cdot B_{\delta\delta} + F_{\delta} \cdot B_{\delta\delta} \quad (13)$$

визначаються граничні умови для розрахунку магнітного кола:

$$B_{\delta\delta} + B_{\delta\delta} = B_{\delta\delta} \quad (14)$$

або

$$B_{\delta\delta}^2 + B_{\delta\delta}^2 = B_{\delta\delta}^2. \quad (15)$$

Умова (14) має місце для лінійної магнітної характеристики, умова (15) – для нелінійної (прямокутної) магнітної характеристики. Розрахунковий струм намагнічування, який визначається для кожної

«окремої» електричної машини, повинен бути збільшений приблизно в 1,5 разу.

4. Розрахунок параметрів суміщеної електричної машини. Проводиться електромагнітний розрахунок генератора, визначаються його струми, напруги, втрати в міді та сталі. Далі визначається потужність двигуна та проводиться електромагнітний розрахунок двигуна і знаходяться його струми, напруги, втрати в міді та сталі. При розрахунку втрат у сталі двигуна та генератора використовуються формули для розрахунку втрат, однак знайдені значення повинні бути збільшені приблизно в 1,2 разу. При знаходженні параметрів робочого режиму розраховуються такі величини: розрахункова повна потужність «генератора»  $S_{\delta}$ ; розрахункові опори «генератора»  $r_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $r_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $x'_{\delta}$ ,  $x'_{\delta}$  та  $x''_{\delta}$ ; розрахункові опори навантаження «генератора»  $r_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $z_{\delta}$ ; активна, реактивна складові струму статора та фазний струм статора  $I_{\delta}$ ,  $I_{\delta}$ ,  $I_{\delta}$ ; коефіцієнт потужності статора  $\cos \phi$ ; струм ротора при номінальному навантаженні  $I_{\delta}$ ; лінійна напруга, що прикладається до кола ротора «генератора»  $U_{\delta}$ ; лінійне навантаження ланцюгів статора та ротора  $A_{\delta 1}$ ,  $A_{\delta 2}$ ; щільності струму обмоток статора та ротора  $J_{\delta 1}$ ,  $J_{\delta 2}$ ; розрахункова потужність двигуна  $P_{\delta}$ , яка дорівнює сумі потужності на валу двигуна, потужності механічних і додаткових втрат; розрахункові опори «двигуна»  $r_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $r_{\delta}$ ,  $z_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $x_{\delta}$ ,  $x'_{\delta}$ ; активна та реактивна складові струму статора двигуна та фазний струм статора  $I_{\delta}$ ,  $I_{\delta}$ ,  $I_{\delta}$ ; лінійні навантаження та щільності струмів кіл статора та ротора двигуна  $A_{\delta 1}$ ,  $A_{\delta 2}$ ,  $I_{\delta 1}$ ,  $I_{\delta 2}$ .

5. Вібраційний розрахунок. Вважаючи, що розподіл магнітних полів у повітряному зазорі є синусоїдальним, то миттєве значення результуючої індукції  $B_{\delta}$  магнітних полів  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$  визначається сумою миттєвих індукцій  $B_{1x}$  та  $B_{2x}$ :

$$B_{\delta x} = B_1 \sin(\omega_1 t + (\pi / \tau_1) x) + B_2 \sin(\omega_2 t + (\pi / \tau_2) x), \quad (16)$$

де  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_2$  – кутові частоти струмів «двигуна» та «генератора»;

$\tau_1 = \pi D_1 / 2p_1$ ,  $\tau_2 = \pi D_2 / 2p_2$  – полюсний поділ полів  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$ ;

$x$  – поточна просторова координата по колу статора в повітряному зазорі;

$B_1$  та  $B_2$  – амплітудні значення магнітних індукцій полів  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$  в повітряному зазорі.

Переходячи від просторової координати  $x$  до поточної кутової координати  $\alpha$ , що визначається з рівності

$$\alpha = \pi \cdot x / \tau_1 \cdot p_1 = \pi \cdot x / \tau_2 \cdot p_2, \quad (17)$$

формулу (17) представимо як

$$B_{\delta\alpha} = B_1 \sin(\omega_1 t + \alpha p_1) + B_2 \sin(\omega_2 t + \alpha p_2). \quad (18)$$

Елементарне значення електродинамічної сили  $dF$ , яка з'являється між статором і ротором у точці зазора з кутовою координатою  $\alpha$  в момент часу  $t$  визначається так:

$$dF = K' B_{\delta\alpha} dS = K B_{\delta\alpha} d\alpha, \quad (19)$$

де  $dS = l \cdot dx = ((l \cdot D) / 2) d\alpha$  – площа елементарної площадки в повітряному зазорі, кут нахилу якої дорівнює  $\alpha$ ;

$K = K'((l \cdot D) / 2) = 2,03 \cdot 10^{-2} \cdot D \cdot l$  – постійний коефіцієнт.

Результуюча електродинамічна сила  $F$ , що діє на поверхні статора та ротора, визначається шляхом додавання всіх елементарних сил  $dF$  з урахуванням кута нахилу елементарних площадок  $\alpha$ , який змінюється в діапазоні від 0 до  $2\pi$ . Очевидно, що можлива поява трьох сил:

$$F_1 = \int_0^{2\pi} K \cdot B_1^2 \cdot \sin^2(\omega_1 t + p_1 \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha; \quad (20)$$

$$F_2 = \int_0^{2\pi} K \cdot B_2^2 \cdot \sin^2(\omega_2 t + p_2 \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha; \quad (21)$$

$$F_3 = \int_0^{2\pi} K \cdot B_1 \cdot \sin(\omega_1 t + p_1 \alpha) B_2 \cdot \sin(\omega_2 t + p_2 \alpha) \cos \alpha \cdot d\alpha; \quad (22)$$

Перший і другий інтеграли  $F_i$  ( $i = 1, 2$ ) знаходяться так:

$$\begin{aligned} F_i &= \int_0^{2\pi} K \cdot B_i^2 \cdot \sin^2(\omega_i t + p_i \alpha) \cos \alpha \cdot d\alpha = K \cdot B_i^2 \int_0^{2\pi} \sin^2(\omega_i t + p_i \alpha) \cos \alpha \cdot d\alpha = \\ &= \frac{K \cdot B_i^2}{3p_i} \sin^3(\omega_i t + p_i \alpha) \Bigg|_{\frac{-\omega_i t}{p_i}}^{\frac{2\pi - \omega_i t}{p_i}} = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Таким чином, електродинамічна сила, яка з'являється під дією свого поля, дорівнює нулю. Електродинамічна сила,

яка з'являється від спільної дії полів  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$ , дорівнює



$$\begin{aligned}
F_3 &= K \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot \int_0^{2\pi} \sin(\omega_1 t + p_1 \alpha) \cdot \sin(\omega_2 t + p_2 \alpha) \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha = \\
&= K \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot \left\{ \int_0^{2\pi} \sin \omega_1 t \cdot \sin \omega_2 t \cdot 0,5 [\cos(p_2 - p_1) \alpha + \cos(p_2 + p_1) \alpha] \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha + \right. \\
&\quad + \int_0^{2\pi} \sin \omega_1 t \cdot \cos \omega_2 t \cdot 0,5 [\sin(p_1 + p_2) \alpha - \sin(p_1 - p_2) \alpha] \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha + \\
&\quad + \int_0^{2\pi} \cos \omega_1 t \cdot \sin \omega_2 t \cdot 0,5 [\sin(p_2 + p_1) \alpha + \sin(p_2 - p_1) \alpha] \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha + \\
&\quad \left. + \int_0^{2\pi} \cos \omega_1 t \cdot \cos \omega_2 t \cdot 0,5 [\cos(p_2 - p_1) \alpha + \cos(p_2 + p_1) \alpha] \cdot \cos \alpha \cdot d\alpha \right\}. \quad (24)
\end{aligned}$$

Другий і третій інтеграли, які входять у вираз (24), визначаються аналогічно виразу (23) і дорівнюють нулю. Перший і четвертий інтеграли, які входять у вираз

(24), у випадку, коли  $p_2 - p_1 = 1$ , відрізняються від нуля, і величина сили  $F_3$  в цьому випадку дорівнює

$$\begin{aligned}
F_3 &= K \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot 0,5 (\sin \omega_1 t \cdot \sin \omega_2 t + \cos \omega_1 t \cdot \cos \omega_2 t) \int_0^{2\pi} \cos^2 \alpha \cdot d\alpha = \\
&= 0,25 \cdot K \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot \cos \omega_1 t \int_0^{2\pi} (1 - 2 \cos 2\alpha) \cdot d\alpha = \frac{\pi}{2} \cdot K \cdot B_1 \cdot B_2 \cdot \cos \omega_1 t. \quad (25)
\end{aligned}$$

Таким чином, для уникнення можливості появи вібраційних електромагнітних сил необхідно при виборі кількості пар полюсів «двигуна» та «генератору» дотримуватись умови  $p_2 - p_1 \neq 1$ .

Суміщена електрична машина може працювати у двох режимах роботи: у режимі генератора та в режимі двигуна. Своєрідність режимів роботи накладає обмеження на синтез регулятора напруги. Зазначимо, що регулятор напруги, по-перше, повинен бути двоканальним, реалізуючи свої закони керування в мережі частотою 50 Гц; по-друге, регулятор

напруги повинен бути таким, що перенастроюється та забезпечує можливість роботи в мережі 50 Гц як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Для розв'язання задачі синтезу регулятора напруги представимо рівняння кожної електричної машини в операторній формі:

$$\Psi_{di}(p) = G(p)_i U_{fi} + x_{di}(p)_i I_{di}; \quad (26)$$

$$\Psi_{qi} = x_{qi}(p)_i I_{qi}; \quad (27)$$

де  $G(p)_i$  – операторна провідність,

$$G(p)_i = \frac{p(x_{rdi}x_{adi}^2 - x_{fi}x_{adi} + x_{adi}x_{rdi})}{p^2(x_{rdi}x_{fi} - x_{adi}^2) + p(x_{rdi}r_{fi} + x_{fi}r_{ri}) + r_{ri}r_{fi}}; \quad (28)$$

$x_{di}(p)$  – операторний опір по осі  $d$ ,

$$x_{di}(p) = x_{di} - \frac{p^2(x_{rdi}x_{adi}^2 - 2x_{fi}x_{adi}^2 + x_{fi}x_{adi}^2) + p(x_{adi}^2r_{fi} + x_{adi}^2r_{ri})}{p^2(x_{rdi}x_{fi} - x_{adi}^2) + p(x_{rdi}r_{fi} + x_{fi}r_{ri}) + r_{ri}r_{fi}}; \quad (29)$$

$x_{qi}(p)$  – операторний опір по осі  $q$ ,

$$x_{qi}(p) = x_{qi} - \frac{p \cdot x_{aqi}^2}{p \cdot x_{rqi} + r_{ri}}. \quad (30)$$

Запишемо рівняння рівноваги напруги в проекціях на осі  $d$  та  $q$ :

$$-U_{di} = r_i \cdot I_{di} + p \cdot G_i(p) \cdot U_{fi} + p \cdot x_{di}(p) \cdot I_{di} + x_{qi}(p) \cdot I_{qi}; \quad (31)$$

$$-U_{qi} = r_i \cdot I_{qi} + p \cdot x_{qi}(p) \cdot I_{qi} - G_i(p) \cdot U_{fi} - x_{di}(p) \cdot I_{di}. \quad (32)$$

Рівняння (31) та (32) отримані при припущенні про постійність частоти обертання ротора  $\omega = 1$  та  $p \cdot \gamma = 1 + p \cdot \delta = 1$ . Це припущення правильне для даної машини, особливо для початкового етапу перехідного процесу. Рівняння (30) та (31) показують залежність напруги від

параметрів електричних машин, характеру та величини навантаження та режиму збудження. У випадку, коли електричні машини не мають демпферних обмоток по осях  $d$  та  $q$ , можна стверджувати, що  $r_{ri} \rightarrow \infty$ . При цьому вирази для  $G_i(p)$ ,  $x_{di}(p)$ ,  $x_{qi}(p)$ , спрощуються та набувають вигляду

$$G_i(p) = \frac{1}{T \cdot d_{oi} \cdot p + 1} \cdot \frac{x_{adi}}{r_{fi}} = \frac{A_i}{B_i(p)}; \quad (33)$$

$$x_d(p) = \frac{x_{di} \cdot T_{di} \cdot p + x_{di}}{T_{doi} \cdot p + 1} = \frac{C_i(p)}{B_i(p)}; \quad (34)$$

$$x_{qi}(p) = x_{qi}; \quad T_{doi} = x_{fi} / r_{fi}; \quad x'_{di} = x_{di} - (x_{adi}^2 - x_{fi}). \quad (35)$$

Рівняння (33) та (34) в цих умовах набудуть вигляд

$$-U_{di} = \frac{p \cdot C_i(p)}{B_i(p)} \cdot I_{di} + \frac{p \cdot A_i}{B_i(p)} \cdot U_{fi} + x_{qi} \cdot I_{qi}; \quad (36)$$

$$-U_{qi} = p \cdot x_{qi} \cdot I_{qi} - \frac{A_i}{B_i(p)} \cdot U_{fi} - \frac{C_i(p)}{B_i(p)} \cdot I_{di}. \quad (37)$$

Рівняння (36) та (37) отримані в припущенні, яке звичайно приймається при

дослідженні електричних машин, що  $r_i = 0$ . З рівнянь (36) та (37) випливає, що

$$B_i(p) \cdot U_{di} = -p \cdot C_i(p) \cdot I_{di} - p \cdot A_i \cdot U_{fi} - x_{qi} \cdot I_{qi}; \quad (38)$$

$$B_i(p) \cdot U_{qi} = A_i \cdot U_{fi} + C_i(p) \cdot I_{di} - p \cdot x_{qi} \cdot I_{qi}. \quad (39)$$

Використовуючи формули (38) та (39), запишемо передаточні функції по каналах керування  $W_{ker i}(p)$ :

$$W_{dker i}(p) = \frac{p \cdot A_i}{B_i(p)}; \quad W_{qker i}(p) = \frac{A_i}{B_i(p)}. \quad (40)$$

При розв'язанні задачі синтезу регулятора напруги закон керування будемо знаходити з умови виконання вимоги про постійність напруги на

затискачах  $i$ -ї електричної машини. При цьому стабілізація напруги досягається у випадку, якщо закон керування має вигляд

$$U_{fi} = \frac{B_i(p)}{A_i} \cdot U_{qi0} + \frac{p \cdot x_{qi}}{A_i} \cdot I_{qi} - \frac{C_i(p)}{A_i} \cdot I_{di}, \quad (41)$$

де  $U_{qi0}$  – проекція напруги на вісь  $q$  в попередньому режимі роботи.

Із умови забезпечення постійності величини  $U_{qi0} = const$  випливає, що

$$U_{fi} = \frac{U_{qi0}}{x_{adi}} + \frac{x_{ai}}{x_{adi}} \cdot p \cdot I_{qi} - \frac{x'_{di} \cdot T_{d0i} \cdot p + x_d}{x_{adi}} \cdot I_{di}. \quad (42)$$

Таким чином, регулятор, що синтезується, належить до класу комбінованих регуляторів сильної дії, які суміщують регулювання з відхилення з регулюванням за збудженням. У сигналі за збудженням при цьому є не тільки величина струму навантаження, але й її перша похідна. Знайдений закон керування режимом збудження забезпечує стабілізацію напруги в генераторному режимі роботи. У режимі двигуна при роботі по мережі 50 Гц регулятор напруги

повинен бути перенастроєний таким чином, щоб машини, яка є двигуном, працювала в якості синхронного компенсатора та була готовою в будь-який момент прийняти все навантаження мережі 50 Гц. Природно, що під час роботи в режимі двигуна необхідно змінювати струм збудження регулятора напруги залежно від зміни навантаження на шинах мережі 50 Гц таким чином, щоб у момент зникнення напруги в мережі 50 Гц провал напруги дорівнював нулю. Це буде мати місце за умови

$$(E - I_p \cdot \cos \Theta \cdot x_d)^2 + I_p^2 \cdot \sin^2 \Theta \cdot x_q \approx 1. \quad (43)$$

З рівняння (42) випливає, що для забезпечення стабілізації напруги струм

збудження повинен змінюватися за законом

$$I_f = \frac{1}{x_f} \left( \sqrt{l - I_p^2 \cdot \sin^2 \Theta \cdot x_q^2} + I_p \cos \Theta \cdot x_d \right). \quad (44)$$

На рис. 2 наведена схема системи регулювання напруги, яка дозволяє здійснити незалежне регулювання напруги в різних режимах роботи суміщеної

електричної машини. Регулятор напруги виконано двоканальним. Перший канал (регулятор 9) забезпечує стабілізацію напруги в мережі РП 10 кВ, другий канал

(регулятор 40) забезпечує стабілізацію напруги в мережі живлення ВЛ СЦБ. Розглянемо роботу каналів регулятора. Під час роботи в режимі двигуна суміщеної машини, тобто в режимі, коли є напруга живлення на мережевому вводі, обмотка коректування 26 суматора 9 приєднана до виходу вимірювача реактивного навантаження 20 в мережі вводу машини. При цьому обмотка збудження 8 отримує через випрямляч 21 результуючий сигнал з

виходу вторинної обмотки 25 суматора регулятора напруги 11, забезпечуючи тим самим регулювання напруги залежно від величини реактивного навантаження мережі РП 10 кВ та виключаючи провал напруги на шинах живлення ВЛ СЦБ 3 при зникненні напруги на вводі 1. У випадку, коли напруга на вводі 1 зникла, перша статорна обмотка суміщеної машини 5 з режиму двигуна переходить у генераторний режим.

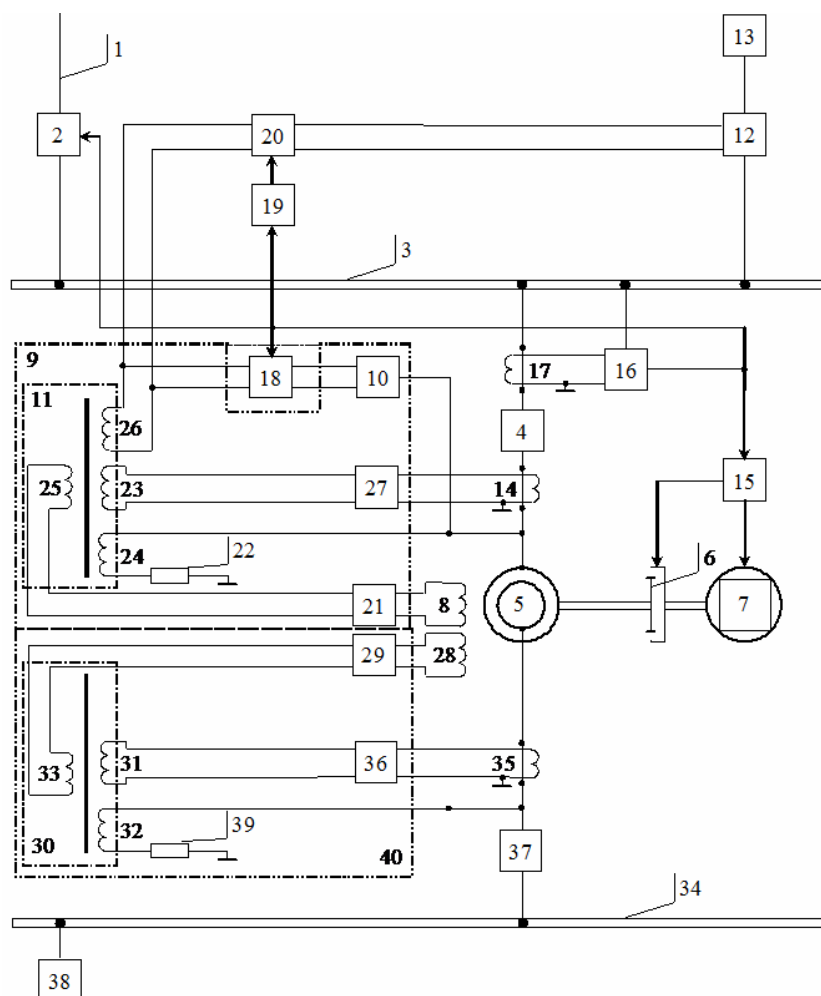


Рис. 2. Схема регулятора напруги резервного джерела

Перехід суміщеної електричної машини 5 у генераторний режим роботи фіксується блоком виявлення режимів роботи 16, який спрацьовує та вмикає реле пуску приводного двигуна 15, вмикає

вимикач мережевого вводу 2, відкриває першу 18 і закриває другу 19 схеми заборони.

Реле пуску 15, спрацювавши, вмикає роз'єднувальну муфту 6 і вмикає в роботу

схему пускової автоматики приводного дизеля 7. Регулятор 9 після закривання другої схеми заборони 19 і відкриття першої схеми заборони 18 перенастроюється та переходить на стабілізацію напруги в генераторному режимі роботи першої статорної обмотки суміщеної електричної машини 5. Другий канал регулятора постійно забезпечує стабілізацію напруги на шинах живлення 34 в генераторному режимі роботи другої статорної обмотки суміщеної електричної машини 5.

**Висновки.** У процесі рішення завдань дослідження було встановлено, що для систем, у яких у якості резервного джерела електричної енергії використовуються дизель-генератори, найбільш перспективною є ДІ УГЖ на основі суміщеної електричної машини. Результати досліджень при цьому дозволяють обґрунтувати прийняті технічні рішення,

що дає змогу при їхній реалізації забезпечити досягнення бажаного ефекту при впровадженні на тягових підстанціях для забезпечення швидкісного руху.

Запропонована методика проектування суміщених електричних машин дозволяє обґрунтовано вибрати електромагнітні та лінійні навантаження електричних машин перетворювача, розрахувати їхні магнітні ланцюги, вибрати параметри, перевірити можливість виникнення вібрацій і вибрати структуру регуляторів напруги. Вірогідність і обґрунтованість отриманих результатів підтверджена в процесі імітаційного моделювання УГЖ. Розроблені рекомендації дозволяють вдосконалити відомі дизель-інерційні системи [6] і запропонувати ряд рішень при модернізації тягових підстанцій і для використання в новітніх блочно-модульних підстанціях при швидкісному русі.

#### *Список використаних джерел*

1. Долдин, В. М. Электроснабжение нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Устройство, обслуживание, ремонт [Текст]: учеб. пособие / под. ред. В. М. Долдина. – М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2010. – 304 с.
2. Марикин, А. Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций [Текст]: учеб. пособие для вузов ж-д транспорта / А.Н. Марикин, А.В. Мизинцев. – М.: ГОУ «Учебное методический центр по образованию на железнодорожном транспорте» 2008. – 220 с.
3. Феоктистов, В. П. Электрические железные дороги [Текст]: учебник / под ред. проф. В.П. Феоктистова, проф. Ю.Е. Просвинова; [Моск. ун-т путей сообщения; Самарская гос. акад. путей сообщения]. – Самара: СамГАПС, 2006. – 312 с.
4. Сулейманов, В. М. Электрические сети и системы [Текст]: учебник / В.М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – К.: НТУУ «КПИ», 2008. – 504 с.
5. Онищенко, Г. Б. Электрический привод [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Б. Онищенко. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
6. Тер-Оганов, Э. В. Электроснабжение железных дорог [Текст]: учебник для студентов университета (УрГУПС) / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.
7. Бородулин, Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока [Текст] / Б.М. Бородулин // Вестник Всерос. науч. иссл. ин-та ж.-д. трансп. – 2003. – № 92. – С. 17-24.
8. Веников, В. А. Электрические системы. Электрические сети [Текст] / В. А. Веников, А. А. Глазунов, Л. А. Жуков; под ред. В. А. Веникова, В. А. Строева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1998. – 511 с.

9. The DTT device: Power supplies and electrical distribution system [Text] / A. Lampasi [et al.] // Fusion Engineering and Design. – 2017, January.
10. Offset-Free Model Predictive Control for Output Voltage Regulation of Three-Phase Inverter for Uninterruptible Power Supply Applications [Text] / Seok-Kyoon Kim, Chang Reung Park, Young Il Lee // IFAC Proceedings Volumes. – 2014. – Vol. 47. – P. 129-134.
11. Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe [Text] / H. C. Gils [et al.] // Energy. – 2017, January. – Vol. 123. – P. 173-188.
12. Система гарантованого живлення [Текст]: а. с. № 1576987. СССР, МКИ Н 02 J 9/02 / Кононов Б.Т., Вискман А.С., Супрун О.Д.; опубл. 1990, Бюл. № 25.

---

Супрун Олександр Данилович, канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Семененко Юрій Олександрович, асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Ушаков Олександр Васильович, магістрант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Suprun Oleksandr Danylovych, Ph.D., associate professor Department of electricity, electrical engineering and electrical engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Semenenko Yuriy Oleksandrovych, assistant Department of electricity, electrical engineering and electrical engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Uschakov Oleksandr Vasulovych, graduate student Department of electricity, electrical engineering and electrical engineering, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-74. E-mail: slider2012@i.ua.

Стаття прийнята 20.04.2017 р.