

УДК 621.311

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.153.2015.64030>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ УСТАНОВОК  
ГАРАНТОВАНОГО ЖИВЛЕННЯ БЛОЧНО МОДУЛЬНИХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ**

**Кандидат технічних наук, доцент Супрун О.Д.  
магістр Коваленко О.В**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ УСТАНОВОК  
ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ БЛОЧНО МОДУЛЬНЫХ ТЯГОВЫХ  
ПОДСТАНЦИЙ**

**Кандидат технических наук, доцент Супрун О.Д.  
магистр Коваленко О.В.**

**RESEARCH FACILITIES TRANSIENT OPERATING CONDITIONS OF GUARANTEED  
POWER SUPPLY BLOCK MODULAR TRACTION SUBSTATION**

**Candidate of Technical Sciences, associate professor Suprun O. D.  
master, Kovalenko O. V.**

*В статті запропонована математична модель, що встановлює зв'язок між параметрами та можливими збуреннями електротягової системи. Розроблена методика розрахунку кидків струму та провалів напруги в режимах коротких замикань та зникнення напруги мережного введення. Запропоновані рекомендації щодо підтримки необхідної якості напруги.*

**Ключові слова:** установки гарантованого живлення, шини гарантованого живлення, електро тягова мережа, система електропостачання.

*В статье предложена математическая модель, которая устанавливает связь между параметрами и возможными возмущениями электротяговой системы. Разработана методика расчета бросков тока и провалов напряжения в режимах коротких замыканий и исчезновения напряжения сетевого ввода. Предложены рекомендации относительно поддержки требуемого качества напряжения.*

**Ключевые слова:** установки гарантированного питания, шины гарантированного питания, электротяговая сеть, система электроснабжения.

*In this study, the analysis of the known systems of guaranteed power supply, the results of which selected diesel - inertial system with elektromashinnym converter electrical energy.*

*This setup has significant advantages in the case of the power supply system, where as a backup power source installed diesel power plants. To meet the requirements of consumers to quality electrical give reasons for disturbances in the system. To do this, a mathematical model that establishes a relationship between the parameters of the system and possible disturbances that may occur during system operation. The method of calculation of current spikes and voltage dips in the short-circuit and power failure in the mains lead. Recommendations regarding support for the required voltage quality, developed ways to control and circuit systems that implement them, the pilot study confirm the validity of the decisions taken.*

**Keywords:** installation of uninterruptible power supply, uninterruptible power supply bus, electrotraction network, electrical power system

**Вступ.** Впровадження тягових підстанцій блочно модульних новітніх технологій з використанням мікропроконтролерів спонукає ріст кількості одиничної й сумарної встановленої потужності відповідальних електроприймачів, нормальна робота яких може бути забезпечена тільки в умовах гарантованого безперебійного живлення. Підвищення вимог цих електроприймачів до надійності і якості електроживлення зажадали у процесі розробки систем автоматизованого управління тягового електропостачання, вирішення питання безперебійного живлення таких електроприймачів.

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими та практичними завданнями.** Одночасно ускладнюються процеси перетворення енергії, розширюється різноманіття енергетичних установок та агрегатів, що забезпечують найбільш раціональні режими енергоживлення споживачів ВЛ СЦБ. Поряд зі зростанням кількісних показників енергозабезпеченості все більшу роль починають грати показники якості використання та споживання електричної енергії. Установки гарантованого живлення в ряді випадків, особливо пов'язаних з появою аварійних ситуацій, не дозволяють забезпечити

безперебійність електропостачання з підтримкою при цьому необхідних показників якості електричної енергії.

**Визначення мети і задачі дослідження.** Для з'ясування причини зниження показників якості електричної енергії в перехідних режимах роботи інерційних УГЖ і розробки рекомендацій із запобігання негативних ефектів необхідно встановити причинно - слідчі зв'язки, що спричиняють появу збурювань в системах електропостачання з такими УГЖ, і запропонувати заходи, впровадження яких забезпечить ослаблення або, по можливості, повне усунення небажаних збурювань.

**Основна частина дослідження** При зникненні напруги на введенні зовнішньої мережі здійснюється автоматичний перехід УГЖ [2,8,9] у режим «Автономія» шляхом вимикання вимикача мережного вводу, запуску дизеля й вмикання роз'єднувальної муфти. Такий перехід еквівалентний набросу навантаження на генератор і супроводжується провалом напруги на шинах гарантованого живлення (ШГЖ). При цьому напруга на ШГЖ може виявитися такою, що не буде задовольняти вимогам електроприймачів першої категорії. Величина провалу напруги буде визначатися величиною навантаження та величиною струму електричної машини[4,5]. Для розрахунку напруги на ШГЖ і визначення кидків струму при зміні режиму роботи УГЖ

проаналізуємо характер перехідного машини з однією обмоткою збудження й процесу. Аналіз роботи синхронної машини з аспокійливою обмоткою запишемо в виконаємо, використовуючи рівняння системі відносних одиниць у наступному Горєва-Парка, які для явно полюсної виді:

$$\begin{aligned} -U_d &= r \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega \Psi_q; -U_q = r \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d; \\ U_f &= r_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\ 0 &= r_{rd} \cdot i_{rd} + \frac{d\Psi_{rd}}{dt}; 0 = r_{rq} \cdot i_{rq} + \frac{d\Psi_{rq}}{dt}; \end{aligned} \quad (1)$$

$U_f, U_d, U_q$  - напруга статорних обмоток в осях d та q й напруга обмотки збудження;

$\Psi_{2d}, \Psi_{2q}, \Psi_d, \Psi_q, \Psi_f, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$  - потокозчеплення статорних і роторних контурів;

$r, r_f, r_{rd}, r_{rq}$  - активні опори статорних і роторних контурів;

$i_d, i_q$  - проекції струму статора електричної машини на координатні осі d і q;

$i_f, i_{rd}, i_{rq}$  - струми роторних контурів;

$\omega$  - кутова частота обертання.

Потокозчеплення визначаються по наступних формулах:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= i_d x_d + i_f x_{ad} + i_{rd} x_{ad}; \Psi_q = i_q x_q + i_f x_{aq} + i_{rq} x_{aq}; \\ \Psi_f &= i_d x_{ad} + i_f x_{ad} + i_{rd} x_{ad}; \Psi_{rg} = i_q x_{ad} + i_{rd} x_{rd} \end{aligned} \quad (2)$$

де  $x_d, x_q, x_f, x_{rd}, x_{rq}, x_{ad}, x_{aq}$  - реактивні опори синхронної машини.

Рівняння (1), необхідно доповнити рівняннями зв'язку, що визначають залежність напруги на ШГЖ від величини навантаження й струму генератора.

$$U_d = r_n i_d + x_n i_q; U_q = r_n i_q + x_n i_d; \quad (3)$$

І рівнянням руху ротора:

$$H j \frac{d\omega}{dt} = \Psi_q i_d - \Psi_d i_q - M g \quad (4)$$

де  $H_j$  - інерційна постійна;

$\Psi_q i_d - \Psi_d i_q = M_e$  - електромагнітний момент машини;

$M_g$  - рушійний момент машини.

Рівняння (1), (2), (3), (4) утворюють систему диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес при зміні режиму роботи електричної машини. За допомогою цих рівнянь можливо охарактеризувати й коротке замикання на ШГЖ, поклавши в (3), що  $r_n = x_n = 0$ .

Рішення системи диференціальних рівнянь електричної машини по повним рівнянням Горєва - Парка представляє відомі труднощі й для практичного завдання, що цікавлять нас, вихідні співвідношення можуть бути істотно спрощені. Це обумовлено наступними обставинами. Максимальні напруги й кидки струму при зміні режиму роботи УГЖ мають місце відразу ж після переходу електричної машини з режиму двигуна в генераторний режим після зникнення напруги на мережному введенні або безпосередньо відразу ж після короткого замикання на ШГЖ [12]. При цьому в початкові моменти кутова частота обертання вала практично

залишається постійною, а значить при дослідженні досить обмежитися аналізом характеру протікання електромагнітних перехідних процесів. Крім того в початкові моменти часу можна вважати, що потокозчеплення обмоток генератора мале і його можна не враховувати.

Допущення про сталість потокозчеплення для початкового етапу перехідного процесу дозволяє перейти від диференціальних рівнянь до алгебраїчних. Погрішність, пов'язана із цим, оцінена за допомогою інтеграційних рівнянь і не перевищує 5%. У результаті рішення алгебраїчних рівнянь виявляється можливим знайти складові шуканих змінних, рівні сталим значенням, які одержуються без врахування розсіювання енергії в системі. Оскільки попередні в перехідному процесі значення змінних можна вважати відомими, то виявляється можливим визначити аперіодичні складові шуканих величин. З огляду на прийняті допущення й виходячи із

того, що у вихідному сталому режимі роботи частота обертання дорівнює номінальному значенню  $\omega_{ном}$ , що відповідає в системі

$$r_{\text{н}} i_{dy} + x_{\text{н}} i_{qy} = -\Psi_q; r_{\text{н}} i_{dy} + x_{\text{н}} i_{qy} = \Psi_d \quad (5)$$

Допущення про сталість потокозчеплень дозволяє затверджувати, що потокозчеплення в перший момент часу в генераторному режимі роботи електричної

відносних одиниць умові  $\omega_{ном}=1$ , одержуємо наступну систему рівнянь для визначення сталих значень струму електричної машини:

машини рівні їхнім попереднім значенням для її роботи в режимі двигуна. Це означає, що

$$\Psi_q = i_{q0} x_q; \quad \Psi_d = i_{q0} x_0 + i_{f0} x_{ad} \quad (6)$$

де  $i_{d0}$ ,  $i_{q0}$ - значення струмів для роботи електричної машини в режимі двигуна.

Вирази (6) отримані з (2), оскільки в сталому режимі роботи  $i_{rd0}=i_{rq0}=0$ .

Підставляємо (6) в (5), одержуємо:

$$r_{\text{н}} i_{dy} + x_{\text{н}} i_{qy} = -i_{q0} x_q; r_{\text{н}} i_{qy} + x_{\text{н}} i_{dy} = i_{q0} x_d + i_{f0} x_{ad}; \quad (7)$$

Вирішуючи (7), знайдемо  $i_{dy}$  і  $i_{qy}$

$$i_{dy} = -i_{q0} x_q g_{\text{н}} - (i_{d0} x_d + i_{f0} x_{ad}) b_{\text{н}}; i_{qy} = -i_{q0} x_q g_{\text{н}} + (i_{d0} x_d + i_{f0} x_{ad}) g_{\text{н}} \quad (8)$$

$$\text{де } g_{\text{н}} = \frac{r_{\text{н}}}{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}; b_{\text{н}} = \frac{x_{\text{н}}}{r_{\text{н}}^2 + x_{\text{н}}^2}$$

Амплітудні значення аперіодичних складових струмів  $i_{da}$  і  $i_{qa}$  знайдемо по наступних формулах:

$$i_{da} = i_{d0} - i_{dy} = i_{q0} x_q g_{\text{н}} + (i_{d0} x_d + i_{f0} x_{ad}) b_{\text{н}} + i_{d0}; \\ i_{qa} = i_{q0} - i_{qy} = i_{q0} x_q b_{\text{н}} + i_{q0} + (i_{d0} x_d + i_{f0} x_{ad}) g_{\text{н}} \quad (9)$$

Виходячи з того, що за час, рівний 0,01 с, загасання аперіодичної складової незначно, знайдемо величини початкових кидків струму:

$$i_d = -2i_{q0} x_q g_{\text{н}} - 2(i_{d0} x_d + i_{f0} x_{ad}) b_{\text{н}} - i_{d0}; \\ i_q = -2i_{q0} x_q b_{\text{н}} + 2(i_{d0} x_d + i_{f0} x_{ad}) g_{\text{н}} - i_{q0}; \\ i_{f0} = \frac{E}{x_{ad}}, \quad 0.8 \leq E \leq 1.2 \quad (10)$$

Значення

$i_{d0}$  і  $i_{q0}$  для вихідного стану, що передуює переходу в генераторний режим роботи, визначимо, виходячи з векторної діаграми генератора[2].

З векторних діаграм слідує,

$$i_{f0} = \frac{E - U \cos \theta_0}{x_{ad}}; \quad i_{q0} = \frac{U \sin \theta_0}{x_q}; \quad (11)$$

де  $\theta_0$ - кут між величинами  $E$  і  $U$  у вихідному режимі роботи.

З (11) видно, що початкові значення  $P_0$ , від якого залежить значення кута  $\theta_0$ . Між величинами  $i_{d0}$  і  $i_{q0}$  визначаються величиною величинами  $P_0$  і  $\theta_0$  існує наступний зв'язок: ЕРС  $E$  и активним навантаженням двигуна

$$P_0 = UI \cos \varphi = UI \cos(\psi_0 + \theta_0) = UI(\cos \psi_0 \cos \theta_0 - \sin \psi_0 \sin \theta_0) \quad (12)$$

З векторних діаграм маємо, що:

$$I_d = I \cdot \cos(\psi_0 - 90) = -I \sin \psi_0; I_q = I \cdot \sin(\psi_0 - 90) = -I \cos \psi_0; \quad (13)$$

Підставляючи (13) і (12), одержуємо:

$$P_0 = U(-I_g \cdot \cos \theta_0 + I_g \cdot \sin \theta_0) \quad (14)$$

Зв'язуючи (14) з (11), знайдемо:

$$P_0 = \frac{U \cdot E}{x_d} \sin \theta_0 = \frac{U^2 (x_d - x_q)}{x_d \cdot x_q} \cdot \sin 2 \theta_0 \quad (15)$$

Вираз (15) дозволяє при відомих величинах  $P_0$ ,  $U_0$  та  $E$  знайти величину кута навантаження  $\theta_0$ . Рішення (15) знаходимо шляхом графічної побудови

функції  $P_0 = f(\theta_0)$ . При цьому графіки  $P_0 = f(\theta_0)$  будується для різних вихідних режимів роботи електричної машини, обумовлених станом кола збудження (величиною  $E$ ,

допустимий діапазоном зміни якої звичайно задають в інтервалі від 0,8 до 1,2). Залежність  $P_0 = f(\theta_0)$  для різних значень  $E$  мають вигляд представлений на рис. 1. По графіках (рис.1), знаючи величину  $P_0$  у відносних одиницях і попередній режим роботи, обумовлений величиною  $E$ , легко знайти шукане значення кута  $\theta_0$  (показано пунктиром на рис.1). При побудові графіків (рис. 1) вихідна величина напруги  $U$  на шинах гарантованого живлення прийнята рівною номінальній і рівній в системі відносних одиниць  $U = 1$ . При необхідності з'ясування впливу можливих коливань напруги зовнішньої мережі на роботу

електричної машини графіки, показані на рис, будують при  $E = 1$  для можливого діапазону змін  $U$ , що лежить у границях  $0,85 \leq U \leq 1,1$ .

Після визначення величини кута  $\theta_0$  не представляє ускладнень обчислення значень  $i_{d0}$  та  $i_{q0}$  по формулах (11). Знайдені значення  $i_{d0}$  та  $i_{q0}$  підставляють в (10) та обчислюють початкові кидки струмів при зміні режиму роботи електричної машини. Для вихідного режиму роботи електричної машини на холостому ходу ( $P = 0$ ) розглянута процедура істотно спрощується, оскільки  $\theta_0 = 0$  і остільки:

$$i_{d0} = \frac{E-U}{x_d}; \quad i_{q0} = 0. \quad (16)$$

Для розрахунків величин  $i_d$  та  $i_q$  по формулах (10) необхідно представити

провідності навантаження  $q_n$  і  $b_n$  в відносних одиницях.

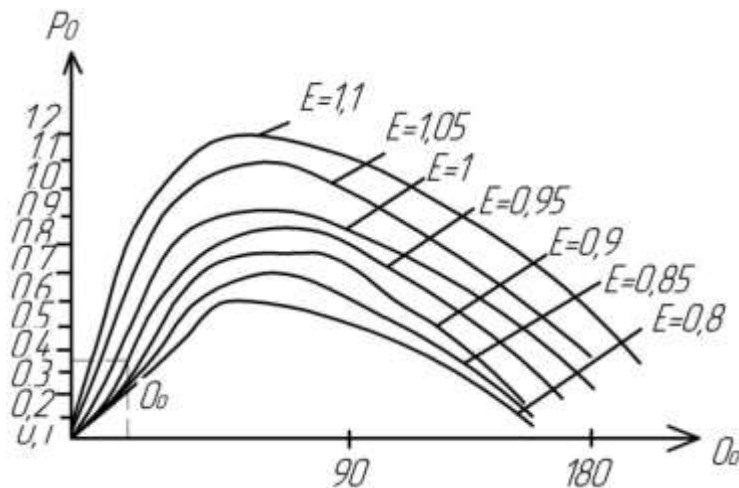


Рис. 1 Графіки функцій  $P_0 = f(\theta_0)$  для різних режимів роботи електричної машини

Для цього необхідно зробити перерахунок опорів всіх елементів схеми системи електропостачання, що найчастіше має вигляд, наведений на рис. 2. На рис. 3 до ШГЖ підключені найбільш відповідальні електро приймачі  $r_{n1} + jx_{n1}$ , електроприймачі другої й третьої категорій  $r_{n2} + jx_{n2}$  підключені з боку високої напруги трансформатора мережного уведення Т1 через свій понижувальний трансформатор Т2.

При зникненні напруги на мережному уведенні електроприймачі  $r_{n1} + jx_{n1}$

та  $r_{n2} + jx_{n2}$  одержують живлення від електричної машини. Розрахункова схема для визначення величин  $q_n$  та  $b_n$  при цьому приймає вид, показаний на рис. 3.

У розрахунковій схемі лінія електропередачі від ШГЖ до трансформаторів Т1 і Т2 представлена індуктивним опором  $x_L$ , а трансформатори Т1 і Т2 представлені опорами  $x_{T1}$  і  $x_{T2}$ . Опір

трансформатора у відносних одиницях обчислюється по формулі:

$$x_T = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном\ T}} \cdot \left( \frac{U_{ном\ T}}{U_6} \right) \quad (17)$$

За номінальну напругу трансформатора потрібно приймати номінальну напругу його первинної обмотки.

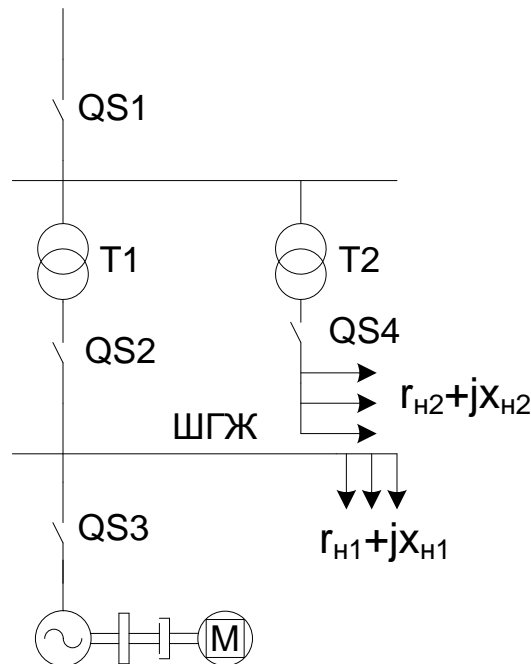


Рис. 2 Розрахункова схема системи електропостачання

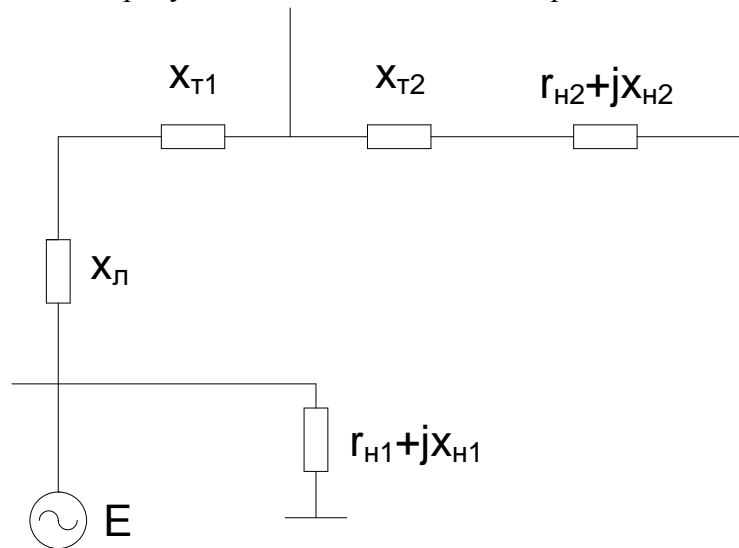


Рис. 3 Приведена розрахункова схема системи електропостачання

Опір лінії передачі у відносних одиницях обчислюється по формулах:

$$x_L = x_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2}; \quad r_L = r_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2} \quad (18)$$

Опір навантаження у відносних одиницях обчислюється по формулах:

$$x_n = x_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2}; \quad r_n = r_0 \cdot \frac{S_H}{U_H^2} \quad (19)$$

Після визначення всіх опорів приведення її до радіально - променевого виду, визначення еквівалентного активного й реактивного опору навантаження,

обчислення для цих опорів провідностей  $q_n$  і  $b_n$  і обчислення по формулах (10) початкових кидків струму при зміні режиму роботи електричної машини. Після того, як величини  $i_d$  і  $i_q$  знайдені, по формулах (3)

легко обчислити величини  $U_d$  і  $U_q$  і приймаючи, що у вихідному режимі напруга на ШГЖ рівнялося номінальному значенню, знайти початковий провал напруги:

$$U = 1 - \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (20)$$

Як і початковий кидок струму, початковий провал напруги повністю визначається попереднім режимом збудження електричної машини й величиною навантаження. Застосовуючи спеціальні заходи, можна звести первинний провал напруги практично до нуля.

Запропонована методика визначення первинних кидків струму при

$$\psi_q = i_{qy} \cdot x_q = 0; \psi_d = i_{dy} \cdot x_d + i_{j0} \cdot x_{ad} = 0. \quad (21)$$

З (21) маємо, що:

$$i_{dy} = 0; i_{dy} = -i_{f0} \frac{x_{ad}}{x_d} \quad (22)$$

Амплітудні значення аперіодичних складових  $i_{da}$  й  $i_{qa}$  знайдемо по формулах:

$$i_{da} = i_{d0} - i_{dy} = i_{d0} + i_{f0} \frac{x_{ad}}{x_d}; i_{qa} = i_{q0} - i_{qy} = i_{q0} \quad (23)$$

Зіставляючи (22) і (23), одержимо співвідношення для розрахунку початкових кидків струму при трифазному короткому замиканні:

$$i_d = -2i_{f0} \frac{x_{ad}}{x_d} - i_{d0}; i_{qa} = i_{q0} - i_{qy} = i_{q0} \quad i_q = -i_{q0} \quad (24)$$

Значення  $i_{d0}$  і  $i_{q0}$  визначається також, як і в розрахунку кидків струму при переході в генераторний режим роботи.

Величина  $i_{f0}$  визначається по формулі:

$$i_{f0} = \frac{E}{x_{ad}} \quad (25)$$

де  $E$  - ЕРС електричної машини у відносних одиницях,  $0,8 \leq E \leq 1,2$ .

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Під час розробки даної статті були з'ясувані причини зниження показників якості електричної енергії в перехідних режимах роботи інерційних УГЖ і розроблені рекомендації із запобігання

негативних ефектів, встановлені причинно - слідчі зв'язки, що спричиняють появу збурювань в системах електропостачання з такими УГЖ, і запропоновані заходи, впровадження яких забезпечить ослаблення або, по можливості, повне усунення небажаних збурювань.

## Список використаних джерел

1. Марикин, А.Н. Новые технологии в сооружении и реконструкции тяговых подстанций[Текст]/А.Н. Марикин, А.В. Мизинцев.- Москва.: Маршрут, 2008.- 220с.
2. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. Л.: Энергия, 1964, 281 с.
3. Хмельник С.И. Электрические цепи постоянного тока для моделирования и управления. Алгоритмы и аппаратура. Published by "MiC" - Mathematics in Computer Comp., printed in USA, Lulu Inc. Израиль-Россия, 2004, 174 с.
4. Кононов Б.Т., Супрун О.Д. Система гарантированного питания А.С. СССР 1576987 от 16.03.1988 г. – БИ № 25, 1990.
5. Лущик В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты / В.Д. Лущик. – К.: Технка, 993. – 203 с.



6. В.М. Аванесов, зав. кафедрой «Энергетика и энергосбережение» Московского института энергобезопасности и энергосбережения, научная статья «Стационарные дизель электростанции»

7. Быков Евгений Александрович. Разработка принципов построения систем гарантированного электроснабжения промышленных предприятий : Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 : Москва, 2005 137 с. РГБ ОД, 61:05-5/2029

8. Апилов В. Р., Тумасянц Р. А., Бабкин В. А., Кравченко С. В. Способы организации бесперебойности в корабельных агрегатах электропитания // Силовая электроника корабельных электротехнических комплексов: Материалы межотраслевого научно-технического семинара/ Новочеркасск, 2007. – С. 133-144

9. Губанов Ю. А., доктор техн. наук, профессор, ОАО «Концерн «НПО «Аврора», научная статья «Агрегаты бесперебойного питания различного назначения»

10. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 . Основы применения. Серия библиотека профессионала – М.:СОЛОН – Пресс, 2005.- 800 с.: ил.

11. Волокитина е.В., к.т.н., Никитин В.В., Опалев Ю.Г., Тебеньков Ф.Г. ОАО «Электропривод», г. Киров. Научная статья «имитационная математическая модель синхронной магнитоэлектрической машины в генераторном режиме в среде Matlab Simulink»

Рецензент докт. техн. наук професор Крашенінін О.С.

---

*Супрун Олександр Данилович, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту*

*Тел.: 067 57 66 174 Email: suprun\_od@mail.ru*

*Коваленко Олексій Віталійович, магістр кафедри автоматизованих систем електричного транспорту Української державної академії залізничного транспорту*

*Тел.: 099 02 54 034 Email: alex.kovaleno.1993@mail.ru*

*Suprun Oleksandr Danilovich, Candidate of Technical Sciences, associate professor Department automated electric vehicle Ukrainian State Academy of Railway Transport*

*Tel.: 067 57 66 174 Email: suprun\_od@mail.ru*

*Kovalenko Oleksij Vitalijovich, master Department automated electric vehicle Ukrainian State Academy of Railway Transport*

*Tel.: 099 02 54 034 Email: alex.kovaleno.1993@mail.ru*

**Стаття поступила 19.05.2015**