

УДК 629.424.2

С.Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, А.С. МАСЛІЙ, Д.П. ПОМАЗАН, О.Е. САФРОНОВ, О.Г. ТУРЕНКО

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗА ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

Сучасний маневровий рухомий склад повинен створюватися на базі сучасних і перспективних технологій транспортного машинобудування. Однією з таких технологій є гібридна система тягового електроприводу, в якій при обміні енергією між контактною мережею і тяговими двигунами беруть участь накопичувачі енергії.

Метою цієї статті є ознайомлення зі своїм баченням концепції перспективного маневрового локомотива з бортовим інерційним накопичувачем енергії як одним з ефективних засобів енергозбереження. Структура і технічні характеристики такого рухомого складу прийняті за результатами аналізу параметрів сучасних поїздів Європи.

Дана праця присвячена розробці математичної моделі роботи маневрового тепловозу ЧМЕЗ. Проведено дослідження, що направлені на вивчення можливості застосування гібридної силової установки на маневровому тепловозі як із базовими ДПС, так і з тяговими вентиляльно-індукторними двигунами (ВИД). Для цього було зроблено наступне:

- запропоновано функціональну схему гібридного локомотива;
- проведені розрахунки дизель-генераторної установки та побудована її імітаційна модель;
- розроблені функціональні схеми та імітаційні моделі накопичувачів енергії;
- ідентифіковані параметри ВИД та складена його імітаційна модель;
- розроблена імітаційна модель роботи гібридного тепловозу з можливим використанням в якості приводного ДПС або ВИД.

Ключові слова: накопичувач енергії, показник якості, область бажаності, маневровий тепловоз, гібридний локомотив, вентиляльно-індукторний двигун, іоністорна батарея, імітаційні моделі, зарядно-розрядні характеристики, осцилограма.

С.Г. БУРЯКОВСЬКИЙ, А.С. МАСЛІЙ, Д.П. ПОМАЗАН, О.Э. САФРОНОВ, О.Г. ТУРЕНКО

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МАНЕВРОВОГО ТЕПЛОВОЗОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Современный маневровый подвижной состав должен создаваться на базе современных и перспективных технологий транспортного машиностроения. Одной из таких технологий является гибридная система тягового электропривода, в которой при обмене энергией между контактной сетью и тяговыми двигателями принимают участие накопители энергии.

Целью настоящей статьи является ознакомление со своим видением концепции перспективного маневрового локомотива с бортовым инерционным накопителем энергии как одним из эффективных средств энергосбережения. Структура и технические характеристики такого подвижного состава приняты по результатам анализа параметров современных поездов Европы.

Данная работа посвящена разработке математической модели работы маневрового тепловоза ЧМЭЗ. Проведены исследования, направленные на изучение возможности применения гибридной силовой установки на маневровом тепловозе как с базовыми ДПС, так и с тяговыми вентиляльно-индукторными двигателями (ВИД). Для этого было сделано следующее:

- предложено функциональную схему гибридного локомотива;
- проведены расчеты дизель-генераторной установки и построена ее имитационная модель;
- разработаны функциональные схемы и имитационные модели накопителей энергии;
- идентифицированы параметры ВИД и составлена его имитационная модель;
- разработана имитационная модель работы гибридного тепловоза с возможным использованием в качестве приводного ДПС или ВИД.

Ключевые слова: накопитель энергии, показатель качества, область желательности, маневровый тепловоз, гибридный локомотив, вентиляльно-индукторный двигатель, ионисторна батарея, имитационные модели, зарядно-разрядные характеристики, осциллограмма.

S.G. BURYAKOVSKY, A.S. MASLII, D.P. POMAZAN, O.E. SAFRONOV, O.G. TURENKO

ENHANCING ENERGY EFFICIENCY OF MANEUVERING DIESEL LOCOMOTIVES BY THE APPLICATION OF ENERGY STORAGE DEVICES

Modern shunting rolling stock should be created on the basis of modern and promising technologies of transport engineering. One of such technologies is a hybrid traction electric drive system, in which energy storage takes part in the exchange of energy between the contact network and traction motors.

The purpose of this article is to familiarize yourself with your vision of the concept of a promising shunting locomotive with an onboard inertial energy storage as one of the effective means of energy conservation. The structure and technical characteristics of such rolling stock are taken according to the analysis of the parameters of modern European trains.

This work is devoted to the development of a mathematical model of the work of the shunting locomotive of CHME3. Studies

have been conducted to investigate the possibility of using a hybrid powerplant on a shunting locomotive with both basic DPS and traction valve induction motors. The following was done for this purpose:

- functional diagram of hybrid locomotive is proposed;
- the calculations of the diesel generator set were carried out and its simulation model was constructed;
- functional circuits and simulation models of energy storage have been developed;
- the parameters of the species are identified and its simulation model is made;
- a simulation model of operation of a hybrid locomotive with possible use as a driving DPS or traction valve induction motors has been developed.

Keywords: energy storage, quality indicator, desirability area, shunting locomotive, hybrid locomotive, valve-induction motor, ionistor battery, simulation models, charge-discharge characteristics, oscillogram.

Постановка проблеми. Ніхто не має сумніву в необхідності заміни морально застарілого і фізично зношеного електрорухомого складу (ЕРС), що експлуатується в даний час на залізницях країни. Вочевидь, що новий рухомий склад такого призначення повинен створюватися на базі сучасних і перспективних технологій транспортного машинобудування.

Однією з таких технологій є гібридна система тягового електроприводу, в якій при обміні енергією між контактною мережею і тяговими двигунами беруть участь накопичувачі енергії.

З точки зору специфіки роботи певних накопичувачів енергії, на транспорті можливе застосування наступних їх видів: пневматичні, надпровідні індуктивні, інерційні, електрохімічні (АКБ), суперконденсатори і проточні редокс-накопичувачі. Пропоновані накопичувачі енергії можливо застосовувати, як в системах електропостачання, так і безпосередньо на рухомому складі. При цьому існують свої переваги і недоліки. Основною перевагою застосування накопичувачів енергії на рухомому складі є зменшення втрат в контактній мережі при передачі енергії від рухомого складу до накопичувачів в режимі рекуперації і назад в режимі тяги, а також автономність транспортного засобу, що особливо важливо в разі аварії в системі електропостачання, можливість його використання на стикових ділянках з різними видами електрифікації або взагалі її відсутність.

Метою роботи є проведення досліджень, що направлені на вивчення можливості застосування гібридної силової установки на маневровому тепловозі як із базовими ДПС, так і з тяговими вентиляльно-індукторними двигунами (ВІД).

Матеріали дослідження. При проведенні дослідження у якості вихідних даних взяті параметри наступних конструкційних складових тепловозу: дизель С18 ACERT, синхронний генератор ГС-500-400, акумулятор LT-LYP 770, конденсатор ИКЭ 40/96, тяговий ДПС послідовного збудження ТЕ-006 та ВІД ДВІ-165. було зроблено наступне:

- запропоновано функціональну схему гібридного локомотива;
- проведені розрахунки дизель-генераторної установки та побудована її імітаційна модель;
- розроблені функціональні схеми та імітаційні моделі накопичувачів енергії;
- ідентифіковані параметри ВІД та складена його імітаційна модель;
- розроблена імітаційна модель роботи гібридного тепловозу з можливим використанням в якості при-

водного ДПС або ВІД.

Вибір та обґрунтування функціональної схеми гібридного тепловоза. Огляд існуючих різновидів систем гібридного тягового приводу локомотивів показав, що в таких системах використовують різноманітні схеми і елементи. Виходячи з аналізу цих систем, пропонується наступна узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу (рис. 1).

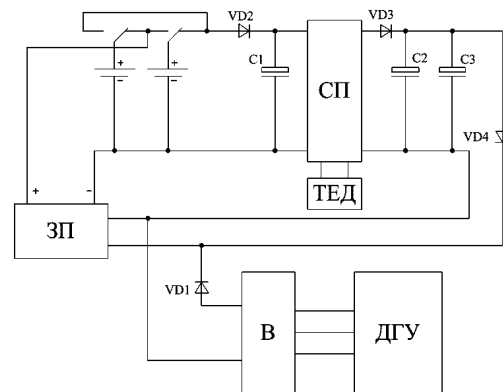


Рисунок 1 – Узагальнена функціональна схема гібридного маневрового тепловозу

Запропонована схема складається з дизель-генераторної установки ДГУ, випрямляча В, зарядного пристрою ЗП, статичного перетворювача СП, тягового двигуна ТЕД та двох накопичувачів енергії – акумуляторної та конденсаторної батареї. Дослідження роботи гібридного тепловоза пропонується виконувати з базовими ТЕД постійного струму та більш перспективними на сьогоднішній день – вентиляльно-індукторними ТЕД.

Для аналізу режимів роботи гібридного тепловозу була складена розгорнута функціональна схема, що наведена на рис. 2.

Запропонована схема складається з пульта керування ПК, статичного перетворювача СП, тягового електроприводу ТЕП, конденсаторної батареї К, зарядного пристрою ЗП, акумуляторної батареї АБ, випрямляча В, синхронного генератора Г та дизеля Д. При виконанні умови (1), що відповідає алгоритму роботи блоку вибору позиції (див. рис. 2), ПК одночасно подає сигнал на роботу СП та Д.

$$N_p = \begin{cases} N_p - 1 & \text{if } I_m > I_n \vee V_t > V_s; \\ N_p & \text{if } I_m < I_n \wedge V_s - 5 \leq V_t \leq V_s; \\ N_p + 1 & \text{if } I_m < I_n \wedge V_t < V_s - 5, \end{cases} \quad (1)$$

де N_p – номер позиції ПК;
 I_m – величина струму тягового двигуна;
 I_n – номінальний пусковий струм двигуна;
 V_t – поточна швидкість руху поїзда;
 V_s – задана швидкість за тахограмою.

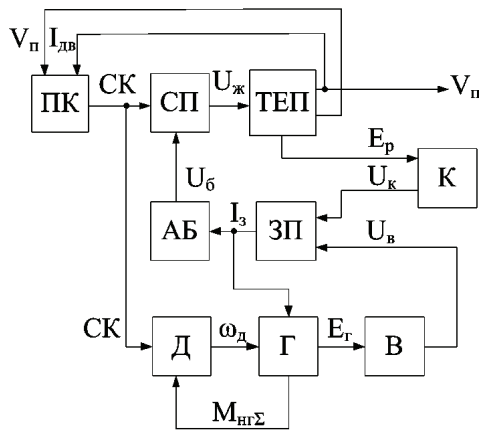


Рисунок 2 – Розгорнута функціональна схема гібридного тепловозу

СП живиться від АБ, заряд якої відбувається через ЗП, який, в свою чергу, може отримувати живлення як від К, так і від Г через В. К заряджається при режимі рекуперативного гальмування та віддає свою енергію при досягненні певного рівня напруги, що відповідає номінальному значенню для роботи ЗП. При низькому рівні напруги на К та розрядженій АБ її живлення здійснюється від Д-Г. В якості ТЕП може виступати як привід постійного, так і змінного струмів.

Вхідними параметрами для блоку ПК є швидкість поїзда V_n та струм двигуна $I_{дв}$, від величин яких залежить сигнал керування СК, який є вхідною величиною для Д і СП. В залежності від СК (тобто номера позиції контролера машиніста) СП визначає рівень напруги живлення ТЕП $U_{ж}$. СП, в свою чергу, отримує вхідну величину напруги U_6 від АБ. ТЕП може працювати як в тяговому режимі, так і в режимі рекуперативності. Вихідними величинами блока ТЕП є швидкість поїзда V_n , струм двигуна $I_{дв}$ (в тяговому режимі) та Е.Р.С. E_p (в режимі рекуперативності). В залежності від величин напруг U_k та U_6 ЗП видає величину струму заряду I_3 , який поступає в АБ та Г. Вхідними величинами блоку Г є значення швидкості дизеля $\omega_{дв}$ та струму I_3 , а вихідними – Е.Р.С. генератора E_2 та моменту навантаження $M_{нг\sigma}$, яке є вхідною величиною для Д.

Математичне моделювання системи Г-Д. Було встановлено, що час використання локомотива на номінальну потужність складає 29 % від загального добового часу експлуатації. Виконавши відповідні розрахунки, було визначено кількість енергії, що витрачається за добу експлуатації локомотива, яка складає 3,48 МВт·год. Виходячи з цього, сумарна добова кількість енергії, що виробляється дизель-генераторною установкою, повинна перевищувати загальнодобову затрачену кількість енергії. А тому в запропонованій системі (див. рис.1) в якості прототипу застосований новий дизель виробництва фірми Caterpillar C18

ACERT, що зображений на рис. 3, а його технічні характеристики приведені в табл. 1.

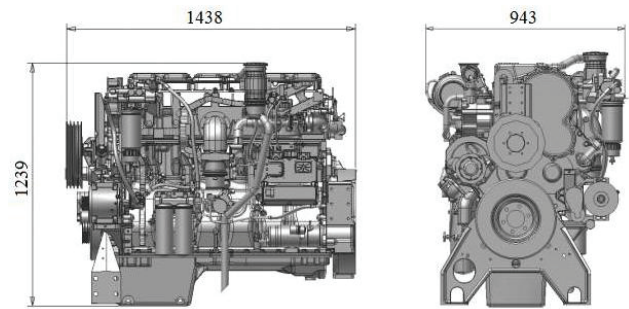


Рисунок 3 – Дизель C18 ACERT

Таблиця 1 – Технічні характеристики дизеля C18 ACERT

Параметр	Значення
Максимальна потужність, кВт	597
Мінімальна потужність, кВт	429
Номінальна частота обертання, об/хв	1800-2100
Конфігурація двигуна	6-циліндровий, 4-тактний
Маса, кг	1673

Двигуни C18 ACERT потужністю 429-522 кВт (575-700 л.с.) при частоті обертання 1800-2100 об/хв. відповідають вимогам стандартів на викид забруднюючих речовин Stage II Китаю, EPA Tier 3 та EC Stage IIIA або еквівалентних їм.

Діаграма роботи дизеля C18 ACERT наведена на рис. 4.

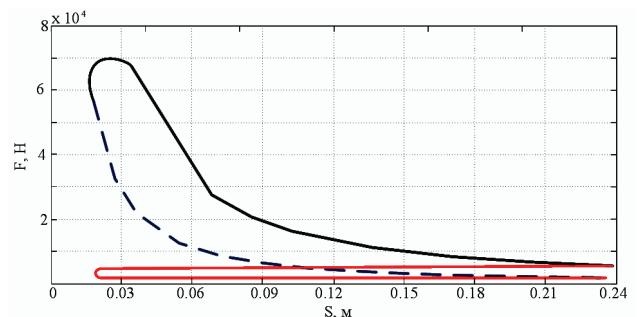


Рисунок 4 – Діаграма роботи дизеля C18 ACERT



Рисунок 5 – Генератор ГС-200-400

Відповідно потужності запропонованого дизеля обрано синхронний генератор з постійними магнітами марки ГС-200-400. Його загальний вид представлений на рис. 5, а технічні характеристики зведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Технічні характеристики дизеля ГС-200-400

Параметр	Значення
Потужність, кВт	200
Напруга, В	400
Номинальний струм, А	900
Кількість фаз	3
З'єднання фаз	зірка
Частота обертання, об/хв.	2000

Імітаційне моделювання генератора виконано за допомогою блоку Synchronous Machine pu Standart з розділу SimPowerSystems програмного комплексу Matlab.

Імітаційне моделювання накопичувачів енергії. Для забезпечення безперервної роботи тепловоза сумарна добова кількість енергії, яку повинен віддавати накопичувач енергії становити не менше 30 % від загальних добових витрат енергії [6]. З огляду на це в якості прототипів накопичувачів енергії на тепловозі застосовані акумулятор LT-LYP 770 (рис. 6) та іоністор ИКЭ 40/96 (рис. 7), технічні характеристики яких приведені у табл. 3 та 4 відповідно.

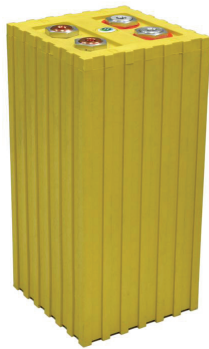


Рисунок 6 – Акумулятор LT-LYP 770



Рисунок 7 – Іоністорна батарея ИКЭ 40/96

Таблиця 3 – Основні технічні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Параметр	Значення
Номинальна ємність, А·год.	770
Номинальна напруга, В	3,2
Питома енергія по масі, Вт · год/кг	105
Ресурс при глибині розрядки 80%, циклів	3000
Саморозряд при зберіганні, % в місяць	< 3
Робота при температурі, °С	від -40 до +50
Маса, кг	9,95

Таблиця 4 – Технічні характеристики ИКЭ 40/96

Параметр	Значення
Напруга, В	110
Ємність, Ф	8,5
Вага, кг	34
Довжина, мм	400
Робота при температурі, °С	від -45 до +50

Оскільки номінальна напруга акумулятора LT-LYP 770 складає 3,2 В, то для живлення ТЕД необхідно 65 послідовно з'єднаних акумуляторів з загальною напругою 198В. Паралельне з'єднання накопичувачів дозволяє отримати великі пускові струми, а також уникнути просадок за струмом при збільшенні навантажень на накопичувач. З метою підтримання номінального струму двигунів пропонується використовувати 3 паралельні гілки.

Іоністорна батарея повинна, з одного боку, забезпечувати можливість накопичення енергії під час рекуперативного гальмування, а з іншого – підтримувати вихідну напругу в діапазоні, що відповідає номінальному рівню для роботи зарядного пристрою [4, 6].

Як відомо, робота акумуляторної батареї відбувається за зарядно-розрядною характеристикою. Для обраного акумулятора розрядна та зарядна характеристики представлені на рис. 8 та рис. 9 відповідно.

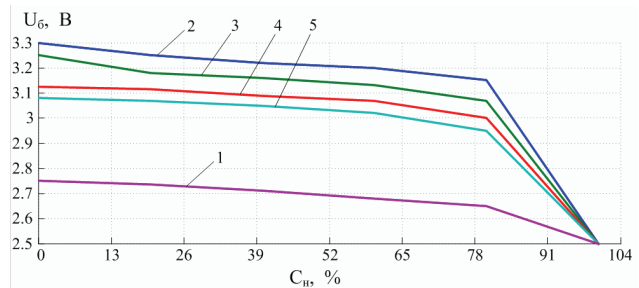


Рисунок 8 – Розрядні характеристики акумулятора LT-LYP 770 для режимів 1, 2, 3, 4, 5

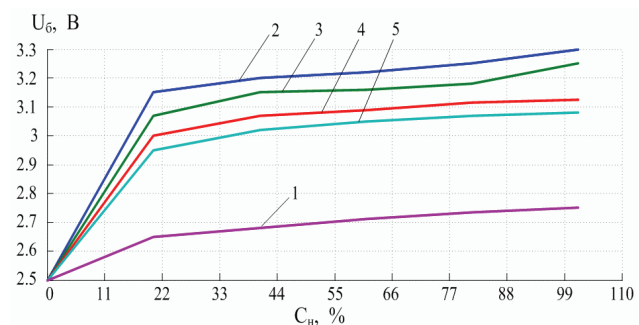


Рисунок 9 – Зарядні характеристики акумулятора LT-LYP 770

Значення сили струму C обраного акумулятора складає 770 А. Функціональна схема накопичувача енергії LT-LYP 770 представлена на рис. 10.

Дана функціональна схема включає в себе чотири основних блока: БВР, БРР, БЗР та БСРАБ. На вхід БВР подаються три величини струмів: струм двигуна у тяговому режимі $I_{де}$, струм двигуна у режимі рекуперативної $I_{рек}$ та зарядний струм від синхронного генератора I_c . В залежності від їх значень БВР вибирає заря-

дний або розрядний режим роботи АБ. БРР та БЗР відпрацьовують задані характеристики (див. рис. 8 і 9) та видають сигнали U_3 і U_p , які відповідають певному рівню напруги АБ, що, в свою чергу, залежать від ампер-годин її роботи у режимі заряду AG_3 та розряду AG_p , а також від величини розрядного I_p і зарядного I_3 струмів. БСРАБ узгоджує між собою два вхідних сигнали U_3 і U_p та видає результуюче значення напруги U_6 АБ.

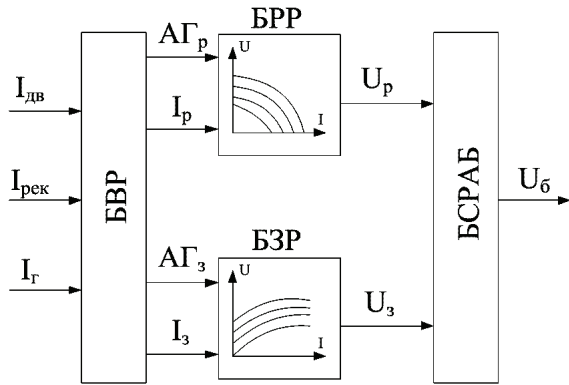


Рисунок 10 – Функціональна схема моделі акумуляторної батареї: БВР – блок вибору режиму роботи батареї, БЗР – блок, що реалізує режим заряду, БРР – блок, що реалізує режим розряду, БСРАБ – блок синхронізації режимів роботи АБ

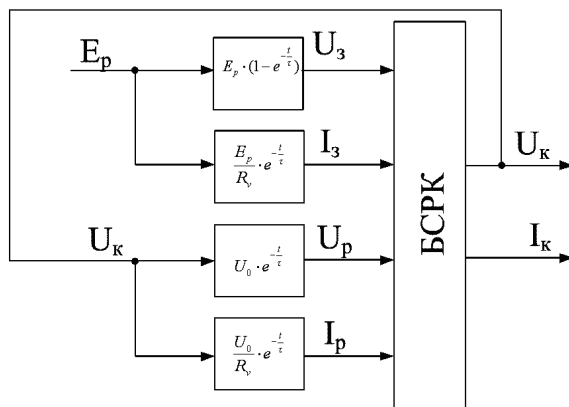


Рисунок 11 – Функціональна схема моделі іоністора

Моделювання іоністора виконувалося на основі наступних рівнянь:

– напруга заряду конденсатора

$$U_3 = E_p \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (2)$$

де E_p – Е.Р.С. двигуна в режимі рекуперації;

t – час заряду конденсатора;

τ – стала часу,

– зарядний струм

$$I_3 = \frac{E_p}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

де R_v – опір зарядного контуру,

– напруга розряду конденсатора

$$U_p = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

де U_0 – початковий розрядний рівень напруги,

– розрядний струм

$$I_p = \frac{U_0}{R_v} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (5)$$

Функціональна схема, що відображає роботу конденсатора наведена на рис. 11.

Використовуючи рівняння (2) та (4) були отримані значення напруг U_3 і U_p та струмів I_3 і I_p , які є вхідними величинами для БСРК. БСРК, в свою чергу, узгоджує між собою ці сигнали та видає результуюче значення напруги U_k та струму I_k конденсатора [2].

Результати імітаційного моделювання роботи гібридного тепловоза з двигуном постійного струму

На основі загальної функціональної схеми (див. рис. 2) та функціональних схем окремих блоків (АБ (див. рис. 10), К (див. рис. 11) в середовищі Matlab було складено імітаційну модель роботи гібридного тепловоза, де був застосований тяговий двигун постійного струму з широтно-імпульсною системою керування.

При дослідженні роботи гібридного тепловозу на імітаційній моделі задавались тахограми з максимальними швидкостями в інтервалі 40-80 км/год з кроком 10 км/год. На рис. 12-16 показані осцилограми роботи гібридного тепловоза з 10 вагонами на профілі шляху, що зображений кривою 5, при різних максимальних швидкостях.

Модель руху поїзда розроблена на основі структурної схеми (рис. 15) з використанням профілю, що відповідає ділянці шляху Харків-Мерефа У запропонованій моделі була врахована можливість переходу тягових двигунів у генераторний (рекуперативний) режим з метою накопичення енергії на іоністорах. Рекуперативне гальмування використовувалося до швидкості 10 км/год, з подальшим догальмовуванням пневматичним гальмом.

Для підтримання поточної швидкості (крива 2) по заданій тахограмі (крива 1) машиністом виконувалося регулювання напруги на тягових двигунах зміною позиції контролера машиніста (крива 3). Зміна однієї позиції відповідає зміні рівня вихідної напруги широтно-імпульсного перетворювача на 10 %. В тяговому режимі струм (крива 6) обмежувався на рівні 600А. Від'ємні значення струму на кривій відповідають режиму рекуперації та заряду конденсатора (крива 7). При досягненні напругою іоністора значення 300 В відбувався процес заряду АБ, величина напруги якої показане кривою 8. З метою дослідження тенденції зміни витрат палива від зміни режиму ведення поїзда існує необхідність у фіксації розходу пального, що відображено кривою 4.

Використовуючи данні таблиці 5 будемо залежності у вигляді тривимірних поверхонь: витрати палива (рис. 17), величина напруги АБ (рис. 18), величина напруги К (рис. 19) від максимальної швидкості тахограми та часу руху перегоном.

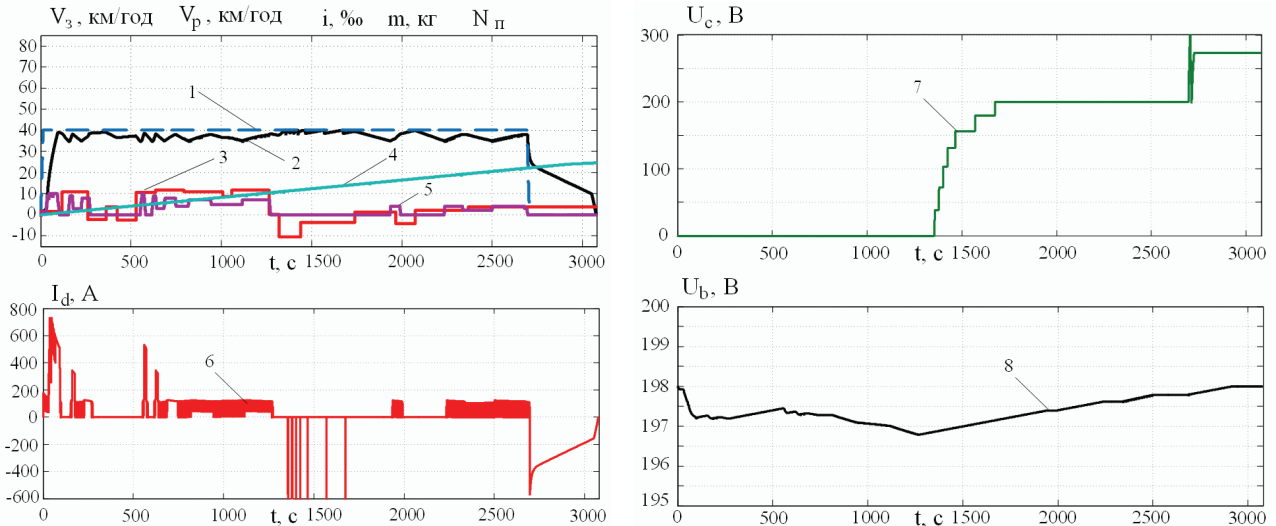


Рисунок 12 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 40 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

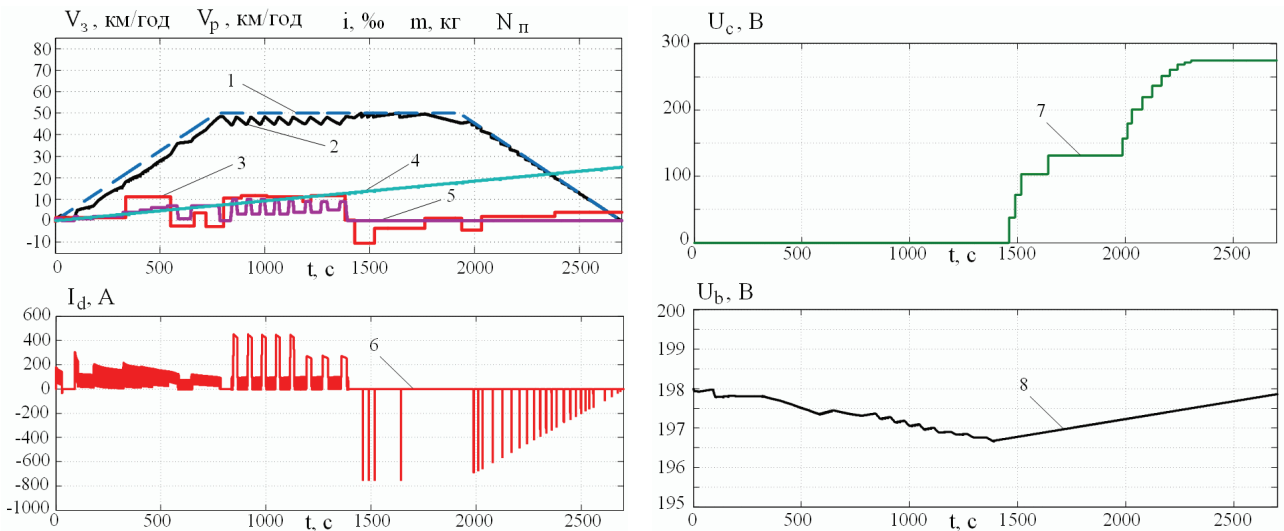


Рисунок 13 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 50 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

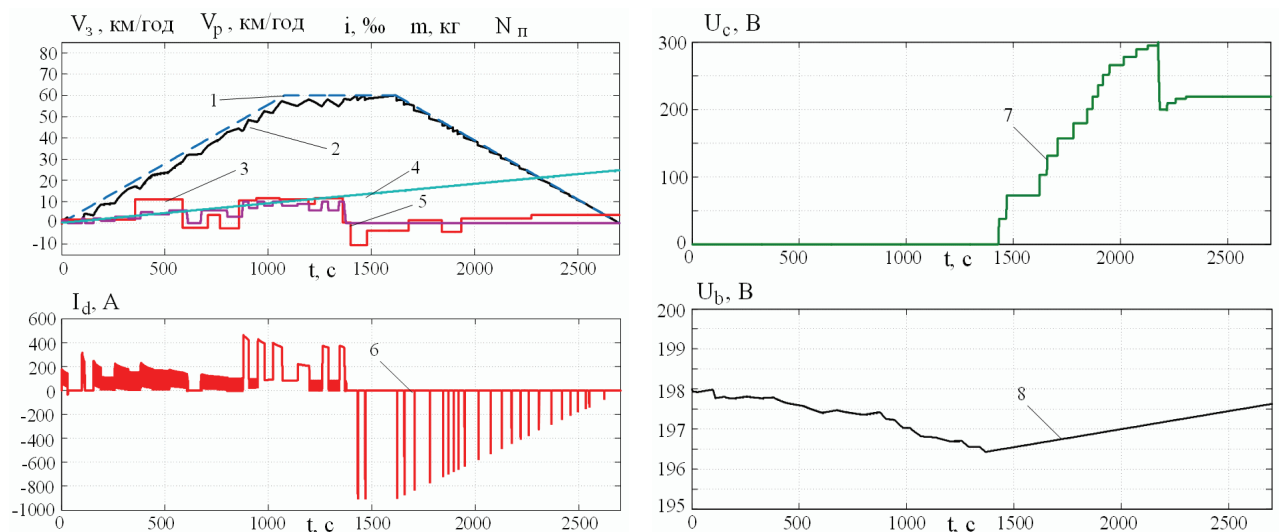


Рисунок 14 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 60 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

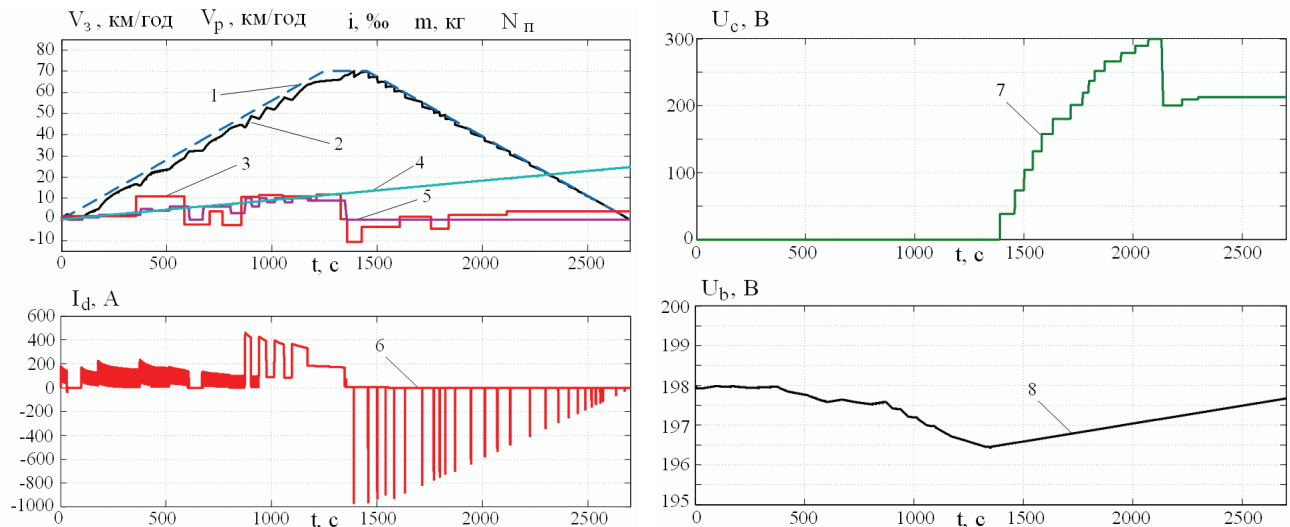


Рисунок 15 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 70 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

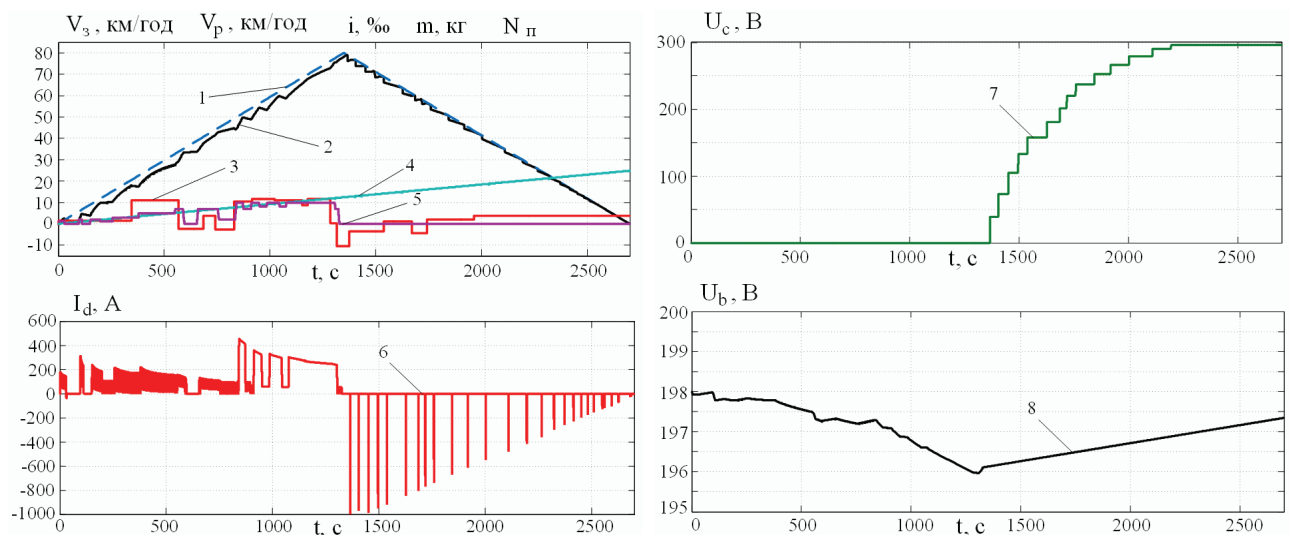


Рисунок 16 – Осцилограми роботи гібридного локомотива з ДПС при максимальній швидкості 80 км/год: 1 – задана тахограма; 2 – реальна швидкість потяга; 3 – профіль шляху; 4 – витрати палива; 5 – номер позиції контролера машиніста; 6 – струм тягового двигуна; 7 – напруга на конденсаторі; 8 – напруга акумуляторної батареї

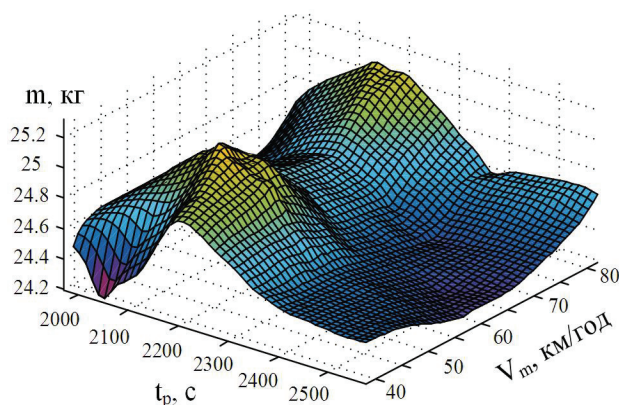


Рисунок 17 – Зміна витрат палива гібридним тепловозом в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

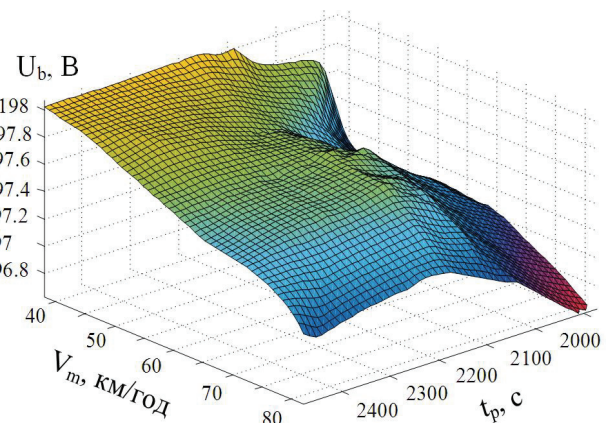


Рисунок 18 – Зміна напруги АБ в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

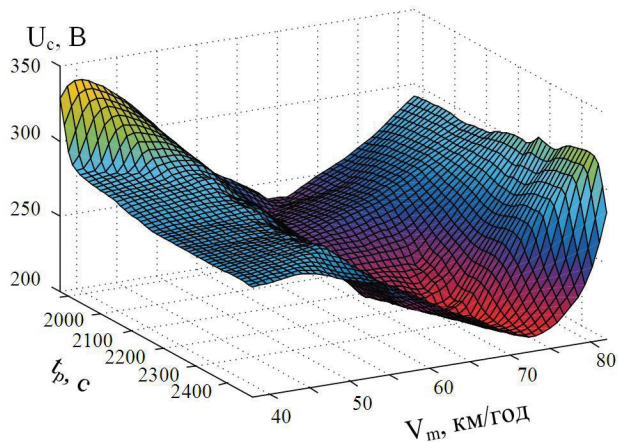


Рисунок 19 – Зміна напруги К в залежності від максимально швидкості трикутної діаграми

Таблиця 5 – Результати моделювання

Максимальна швидкість трикутної тахограми, км/год	Максимальна швидкість руху потяга за тахограмою, км/год	Витрати палива, кг	Величина напруги АБ, В	Величина напруги К, В
70	40	24,48	198	273
	50	24,41	197,9	283
	60	24,24	197,6	234
	70	24,39	197,5	213
75	40	24,43	198	277
	50	24,46	197,9	279
	60	24,37	197,7	228
	70	24,38	197,6	208
80	40	24,58	198	271
	50	24,53	197,8	274
	60	24,47	197,6	221
	70	24,32	197,6	210
85	43	24,98	197,9	278
	50	25,27	197,6	284
	60	24,68	197,8	241
	70	24,73	197,7	253
90	80	25,04	197,4	284
	50	25,09	197,3	292
	60	24,82	197,4	240
	70	24,67	197,2	261
95	80	25,11	196,9	289
	50	24,64	197,1	298
	60	24,59	197,2	235
	70	24,37	197	242
	80	24,61	196,7	287

Висновок. Отримана залежність витрат палива (див. рис. 17) дає змогу стверджувати, що тепловоз із гібридною силовою установкою є більш енергоефективним, ніж традиційний. Спостерігаються два явних максимуми при швидкостях 80 км/год та 50 км/год для трикутної діаграми з максимальною швидкістю 90 км/год. Величини цих екстремумів складають 25,11 та 25,09 кг відповідно. Зменшення витрат палива тепловозом знаходиться у межах 5,62-11,2 кг у порівнянні з традиційною системою, що складає від 18,7% до 31,3 %.

В поверхні (див. рис. 19) спостерігається зона мінімального значення напруги на К (208-261 В) в діапазоні швидкостей 55-75 км/год, що відповідає його переходу в режим заряду АБ. У цьому ж діапазоні швидкостей на поверхні витрати палива спостерігається зона мінімальних значень в результаті зменшення навантаження на дизель.

Аналізуючи залежність величини напруги АБ (див. рис. 18) спостерігається тенденція до збільшення заряду АБ при зменшенні максимальних швидкостей руху по перегону.

Список літератури

1. Байрачний Б.І., Тульський Г.Г., Штефан В.В., Токарева І.А. Технічна електрохімія. Частина V. Сучасні хімічні джерела струму, електроліз розплавів, електросинтез хімічних речовин. Харків: НТУ «ХПБ», 2016. 271 с.
2. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Pomazan D.P., Panchenko V.V. The research of the operation modes of the diesel locomotive ЧМЕЗ on the imitation model. Electrical engineering & electromechanics № 2018/4, Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics, 2018. P. 24-28.
3. Деніс І.В., Буряковський С.Г., Маслій А.С., Помазан Д.П. Обґрунтування необхідності модернізації тепловозу ЧМЕЗ із використанням гібридної силової установки. Електрифікація транспорту. Дніпро: ДНУЗТ, 2016. № 12. С. 82-85.
4. Любушин Н.П., Брікач Г.С. Використання узагальненої функції бажаності Харрінгтона в багатопараметричних економічних задачах. Економічний аналіз. Теорія і практика. 2014. № 18 (369). С.1-10.
5. Іллічов А.С., Наді А.І., Яковлев В.Г. Узагальнений критерій якості частотних перетворювачів. Известия вузів. Північно-кавказький регіон. Технічні науки. 2006. №2. С. 28-31.
6. Омеляненко В.І., Бондаренко В.О., Омеляненко Г.В., Оверьянова Л.В. Накопичувачі енергії – перспективна технологія для залізниць. Міжнародний інформаційний науково-технічний журнал «Локомотив-інформ». Харків: Техностандарт, 2011. № 4. С. 4-9.
7. Круглов В.В., Дли М.І., Голунь Р.Ю. Нечітка логіка і штучні нейронні мережі. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 221 с.
8. Ієлін С.П. Теорія ймовірності і математична статистика на базі MATLAB. Харків: НТУ «ХПБ», 2006. 612 с.
9. Бурков А.Т. Електронна техніка та перетворювачі. Москва: Транспорт, 1999. 464 с.
10. David M. Finite Element Method Magnetics. User's Manual. 2004. Version 3.4. 79 p.
11. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.
12. Соколовський Г.Г., Башарин А.В., Новиков В.А. Управління електроприводами. Енергоіздат, 1982. 392 с.
13. Rasmussen P.O. Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.
14. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. European Journal of Scientific Research, Vol. 47 No.2 (2010). P. 187-196.
15. Denys I., Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskyi B., Karpenko N., Maslii Ar., Pomazan D., Maslii An. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2018. №1/2 (91). С. 68-75.
16. Miller T.J. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. № 49. P. 15–27.

17. Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. IEEE Transaction on Power Electronics. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

18. Ioan-Adrian Viorel, Mircea Crivii, Lars Löwenstein, Loránd Szabó, Mircea Gutman Direct drive systems with transverse flux reluctance motors. Romsnia: Acta Electrotehnica. 2004. № 3.

19. Višinka R. On-fly phase resistance estimation of switched reluctance motor for sensorless based control techniques. Ph.D Thesis. Brno. 2002.

20. Viorel I.A., Strete L., Husain I. An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results. Proc. of 3rdInt. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters. Romania. 2009. P. 97-100.

21. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor. Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering. 2010. P.25.

References (transliterated)

1. Bairachnyi B.L., Tulskeyi H.H., Shtefan V.V., Tokarieva I.A. Tekhnichna elektrokhemiiia. Chastyna V. Suchasni khimichni dzherela strumu, elektroliz rozplaviv, elektrosintez khimichnykh rehovyn [Technical electrochemistry. Part V. Modern chemical sources of current, electrolysis of melts, electrosynthesis of chemicals substances]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. 271 p.

2. Buriakovskiy S.G., Maslii A.S., Pomazan D.P., Panchenko V.V. The research of the operation modes of the diesel locomotive CHME3 on the imitation model. Electrical engineering & electromechanics № 2018/4, Electrotechnical Complexes and Systems. Power Electronics, 2018. P. 24-28.

3. Denis I.V., Buriakovskiy S.H., Maslii A.S., Pomazan D.P. Obgruntuvannia neobkhdnosti modernizatsii teplovozu ChME3 iz vykorystanniam hibrydnoi sylovoi ustanovky [Substantiation of necessity of modernization of CHME3 locomotive using hybrid power plant]. Elektryfikatsiia transportu. Dnipro: DNUZT, 2016. № 12. P. 82-85.

4. Liubushyn N.P., Brikach H.Ie. Vykorystannia uzahalnoyi funktsii bazhannosti Kharrinhona v bahatoparametrychnykh ekonomichnykh zadachakh [Using Harrington's Generalized Function of Gelleability in Multiparameter Economic Problems]. Ekonomichnyi analiz. Teoriia i praktyka. 2014. № 18 (369). P. 1-10.

5. Illichov A.S., Nadi A.I., Yakovliev V.H. Uzahalnenyi kryterii yakosti chastotnykh peretvoriuvachiv [Generalized quality criterion for frequency converters.]. Yzvestyia vuziv. Pivnichnokavkazkyi rehion. Tekhnichni nauky. 2006. № 2. P. 28-31.

6. Omelianenko V.I., Bondarenko V.O., Omelianenko H.V., Overianova L.V. Nakopychuvachi enerhii – perperspektivna tekhnolohiia dlia zaliznyts [Energy storesges – Perspective Technology for Railways]. Mizhnarodnyi informatsiinyi naukovotekhnichniy zhurnal «Lokomotiv-inform». Kharkiv: Tekhnostandart, 2011. № 4. P. 4-9.

7. Kruhlov V.V., Dly M.I., Holun R.Yu. Nechitka lohika i shtuchni neuronni merezhi. [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: FYZMATLYT, 2001. 221 p.

8. Ihlin S.P. Teoriia ymovirnosti i matematychna statystyka na bazi MATLAB [Probability theory and mathematical statistics based on MATLAB]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2006. 612 p.

9. Burkov A.T. Elektronna tekhnika ta peretvoriuvachi [Electronic equipment and converters]. Moskva: Transport, 1999. 464 p.

10. David M. Finite Element Method Magnetics. Users Manual. 2004. Version 3.4. 79 p.

11. Krishnan R. Switched reluctance motor drives. Modeling. Simulation, Analysis, Design and Applications. CRC Press, 2001. 398 p.

12. Sokolovskiy H.H., Basharyn A.V., Novykov V.A. Upravlinnia elektropyvodamy [Control of electric drives]. Enerhoizdat, 1982. 392 p.

13. Rasmussen P.O. Design and Advanced Control of Switched Reluctance Motors. Denmark: Aalborg University, 2002. 256 p.

14. Balaji M., Kamaraj V. Design of High Torque Density and Low Torque Ripple Switched Reluctance Machine using Genetic Algorithm. European Journal of Scientific Research, Vol. 47, No.2 (2010). P.187-196.

15. Denys I., Buriakovskiy S., Babaiev M., Liubarskyi B., Karpenko N., Maslii Ar., Pomazan D., Maslii An. Quality assessment of control over the traction valve-inductor drive of a hybrid diesel locomotive. Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. 2018. №1/2 (91). P. 68-75.

16. Miller T.J. Optimal Design of Switched Reluctance Motors. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. № 49. P. 15–27.

17. Manesh Krishnamurty, Chris S Edrington, Ali Emadi, Peyman Asadi, Mehrdad Fahimi, Babak Fahimi Making the Case for Application of Switched Reluctance Motor Technology in Automotive Product. IEEE Transaction on Power Electronics. May 2006. Vol. 21, No. 3. P. 659-675.

18. Ioan-Adrian Viorel, Mircea Crivii, Lars Löwenstein, Loránd Szabó, Mircea Gutman Direct drive systems with transverse flux reluctance motors. Romsnia: Acta Electrotehnica. 2004. № 3.

19. Višinka R. On-fly phase resistance estimation of switched reluctance motor for sensorless based control techniques. Ph.D Thesis. Brno. 2002.

20. Viorel I.A., Strete L., Husain I. An analytical model of switched reluctance motor based on magnetic field analysis results. Proc. of 3rdInt. Symp. on Electrical Engineering and Energy Converters. Romania. 2009. P. 97-100.

21. Martin MANA: Mathematical model switched reluctance motor, Dept. of Power Electrical and Electronic Engineering. 2010. P. 25.

Надійшла (received) 25.09.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Буряковський Сергій Геннадійович (Буряковский Сергей Геннадиевич, Buryakovskiy Serhii) – доктор технічних наук, професор, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут "Молнія" Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор, м. Харків, Україна; <http://orcid.org/0000-0003-2469-7431>; e-mail: ergbug@i.ua

Маслій Артем Сергійович (Маслий Артем Сергеевич, Maslii Artem) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», старший науковий співробітник кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки; м. Харків, Україна; e-mail: a.masliy@ukr.net

Помазан Данило Повлович (Помазан Данило Павлович, Pomazan Danylo) – аспірант, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», м. Харків, Україна; e-mail: danyl.pomazan@ukr.net.

Сафронов Олег Едуардович (Сафронов Олег Эдуардович, Safronov Oleh) – студент, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», м. Харків, Україна; e-mail: sfrnvolh@gmail.com.

Туренко Олександр Геннадійович (Туренко Александр Геннадиевич, Turenko Alexandr) – студент, Національний технічний університет «Український державний університет залізничного транспорту», м. Харків, Україна; e-mail: Aleksandrturenko97@gmail.com.