

У традиційній системі векторного керування використовуються зворотні зв'язки за швидкістю та струмом, що обробляються ПІ-регуляторами, регулятор швидкості не може створювати умови для точного відпрацювання сигналу завдання за умови впливу моменту навантаження під час його різкої зміни. Для успішного вирішення поставленого завдання необхідно побудувати систему за збуренням та відхиленням, розглядаючи момент навантаження, що оцінюється фільтром Калмана, як сигнал збурення.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення точності керування синхронними машинами з постійними магнітами при наявності абсолютного чи інкрементального енкодера. Суть виконаних досліджень полягає в впровадженні у систему керування самоадаптивного спостерігача Калмана, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування. Найбільш суттєві наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному: 1. Застосування адаптивного спостерігача Калмана на відміну від існуючих способів виміру кутової швидкості здатний оцінювати одночасно положення ротора та швидкість з високою точністю та без часової затримки. 2. Керування синхронним двигуном на базі системи з адаптивним спостерігачем Калмана дозволяє суттєво підвищити показники якості керування, зменшити пульсації кутової швидкості, а також коливання струму i_d при пуску двигуна. 3. Шляхом математичного моделювання доведено, що застосування спостерігача Калмана для таких систем дозволяє підвищити швидкодію системи. 4. Реалізація у системі принципів керування за збуренням з використанням адаптивного спостерігача Калмана для оцінки моменту навантаження дозволяє надати системі можливостей своєчасного реагування на його зміну. Точність відпрацювання заданого сигналу кутової швидкості суттєво підвищується за рахунок оцінки поточного значення навантаження у системі. 5. Реалізація запропонованої системи можлива як при застосуванні абсолютного, так і інкрементального енкодера, оскільки алгоритм визначення положення ротора та кутової швидкості є ідентичним.

Список літератури

1. **S.-K. Sul** Control of Electric Machine Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 2010.
2. **Zhou H., Wen X., Zhao F., Zhang J., Meng J.** An improved flux-weakening strategy for field-oriented-controlled PMSM drives // IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
3. **Кобрин А.В.** Оценка задержки с помощью робастного фильтра Калмана / А.В. Кобрин, Б.С. Тур // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Техніка та електрофізика. – 2013. – № 27. – С. 76-82.
4. **Братусь О.В.** Побудова багатовимірної моделі на основі фільтра Калмана й аналіз алгоритмів оцінювання її параметрів / **О.В. Братусь, В.М. Подладчиков** // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2013. – № 5. – С. 28-34.
5. **Кіку А.Г.** Покращення калмановської фільтрації змінних стану / **А.Г. Кіку, В.М. Аглоткова, О.С. Бурлаков** // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2003. – № 6. – С. 38-43.
6. **Лимонов А.С.** Экстраполяция дискретных сигналов с использованием фильтров Калмана / **А.С. Лимонов, Т.М. Пустовит, А.А. Лимонов** // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 26-37.
7. **Зарицкая Е.И.** Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок / **Е.И. Зарицкая, Л.Н. Канов, А.М. Олейников** // Проблемы техники. – 2013. – № 2. – С. 103-118.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 621.3

А.Б. СЬОМОЧКІН, канд.техн.наук, доц., В.В. ШЕВЧУК, студент
Криворізький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ В ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ

Суперконденсатор здатний функціонувати як пристрій для зберігання електричної енергії, викликає зростаючий інтерес серед фахівців. В даний час в багатьох роботах відзначаються позитивні якості суперконденсаторів (СК), які можуть ефективно застосовуватися для згладжування пікових струмів, що виникають в системах енергоживлення. Істотна увага приділяється застосуванню СК в системах з електромічними джерелами живлення (зокрема з АКБ), що використовуються в якості основних у автономних транспортних засобах. Іоністори являють собою висо-

ко ємнісні конденсатори із подвійним електричним шаром. На відміну від звичайних конденсаторів, іоністори мають характеристики, які дозволяють поєднувати велику потужність і значну енергію. Відомо, що максимальну потужність в навантаженні (споживачі електроенергії) можна отримати за однакової кількості її резистивного опору внутрішньому активному спротиву джерела або накопичувача електричної енергії, в тому числі і СК. Внутрішній активний опір сучасних суперконденсаторів може становити 0,11 ... 1,5 мОм, а максимальна щільність потужності може бути більше 90 кВт / кг, що в 3 тис. разів більше, ніж у пускового свинцевого акумулятора автомобілів.

Дослідження основних властивостей та переваг суперконденсаторів для застосування в електромеханічних системах і є основою даної роботи. Метою даної роботи є складання оптимального алгоритму роботи суперконденсаторів у складі тягової системи ЕМ.

Розглянуто нові технології виготовлення іоністорів на основі деревної тріски, які значно зменшують вартість даних елементів. Проаналізувавши властивості іоністорів були визначені основні напрямки їхнього застосування.

Ключові слова: іоністор, електрична енергія, суперконденсатор, батарея, потужність

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У зв'язку із розвитком потужних силових конденсаторів (іоністорів) та відносно невисокою їх вартістю у відношенні із іншими накопичувачами, перспективним є ємнісні накопичувачі енергії.

Аналіз досліджень та публікацій. Суперконденсатори - нові типи енергоємних конденсаторів з щільністю енергії в 10 разів вище, ніж в традиційних конденсаторах, а потужність імпульсного розряду до 10 разів вище потужності акумуляторних батарей.

Властивості суперконденсаторів:

найвища щільність ємності;

найнижча вартість в розрахунку на 1 фараду;

надійний, тривалий термін служби;

високий ККД циклу (95% і вище);

безперебійна експлуатація;

екологічна безпека;

широкий діапазон робочих температур;

висока питома потужність і досить висока питома енергію;

дуже висока швидкість заряду / розряду;

велика кількість (тисячі) циклів з незначним погіршенням параметрів;

знижена токсичність використовуваних матеріалів;

низький еквівалентний послідовний опір [11].

Постановка завдання. Визначення області застосування ємнісних накопичувачів, в якій можна отримати значний економічний ефект від впровадження даного виду накопичувача.

Викладення матеріалу та результати. Група дослідників з університету Вандербілта (VanderbiltUniversity), Нашвілл Теннесі, розробила суперконденсатори нового типу, велика частина конструкції яких виготовлена з кремнію. Ці суперконденсатори, що демонструють досить високий показник щільності зберігання енергії, дозволяють інтегрувати джерела енергії прямо всередину електронних чіпів, дозволяючи їм виконувати свою роботу протягом тривалого часу навіть при відсутності енергії [6].

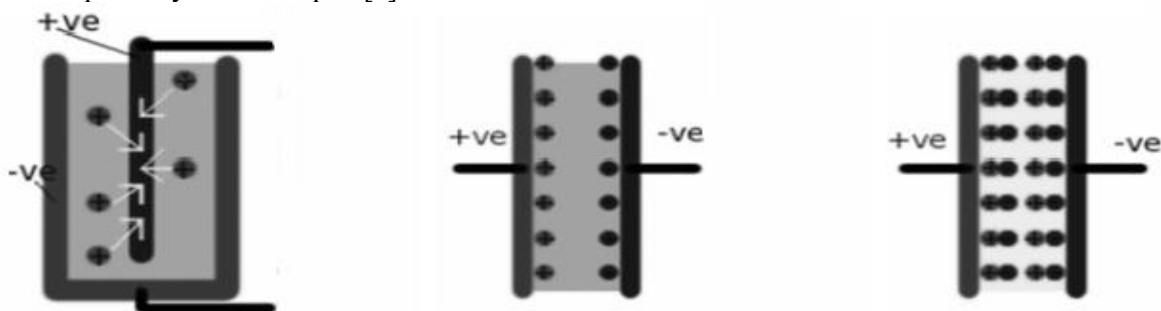


Рис.1. Акумуляторна батарея, конденсатор та суперконденсатор

Технологія роботи суперконденсаторів на основі деревної тріски.

Співробітники Центру стійких технологій при університеті спробували використовувати в якості електродів для суперконденсатора вугілля, отримане при спалюванні деревних відходів. Для цього фрагменти деревини берези, сосни і червоного кедра нагрівали до 750 градусів за Цельсієм, причому без додаткової обробки. Отримані шматочки вугілля використовувались в експериментах повністю і за їх допомоги вдалося побудувати суперконденсатор, який накопичував достатньо енергії для світіння світлодіодного ліхтаря. Вимірювання показали, що про-

тий шматок деревного вугілля може стати електродом для конденсатора з ємністю близько 14 фарад на грам маси. Якщо ж вугілля обробити слабким розчином азотної кислоти, HNO_3 , то верхня межа питомої ємності виростає в вісім разів, до 115 фарад на грам. Крім того, попередні випробування, в ході яких суперконденсатори з вугілля перезарядили більше п'яти тисяч раз без значного зниження їх ємності, показали придатність нового методу до довготривалої експлуатації.

Вчені не уточнили назву видів, деревину яких використовували в досліджах: і якщо з сосною і березою особливих різночитань не виникає, то ось під «червоним кедром», red cedar, позначається як вірджинський ялівець, так і складчаста туя, причому в Австралії зростає ще один «кедр» *Toona ciliata*, який відноситься до сімейства Мелієва [8].



Рис.2. Експериментальний суперконденсатор

Дослідники підкреслюють, що вагомою перевагою їх методу є не просто дешевизна сировини, а поєднання низької вартості матеріалів з простотою обробки. В даний час суперконденсатори з електродами на основі активованого вугілля серійно виробляються з використанням кокосової стружки, але для активації вугілля потрібно обробляти різними хімікатами, які потім підлягають утилізації [5].

Використана винахідниками промивка слабкою азотною кислотою теж передбачає отримання розчину зол в кислоті (ефект підвищення ємності вчені пов'язали з вимиванням з вугілля солей кальцію та інших домішок), однак подібний розчин, за словами авторів нової технології, є готовою сировиною для виробництва добрив, а не небезпечними хімічними відходами.

Дослідження характеристик акумуляторних батарей (АКБ), як базового елементу тягової системи електромобіля (ЕМ), показало, що АКБ характеризуються великою енергоємністю, яку можна дискретно нарощувати, і обмеженням по максимальному піковому струму. Це дуже важливо на етапі пуску, прискорення, а також в стандартному циклі руху [11].

Основною перевагою є можливість досить швидко накопичувати заряд та віддавати його, витримуючи велику кількість циклів заряду-розряду без втрат робочих властивостей. Також до переваг слід віднести більше значення щільності запасаної енергії у розрахунку на одиницю об'єму. Енергія, яка запасується в конденсаторі, безпосередньо залежить від його ємності. Якщо ємність звичайного електролітичного конденсатора кілька мікрофарад, то іоністор такого ж розміру має ємність в кілька фарад [6].

Чи ефективно застосування суперконденсаторів в автомобілях? Кращим рішенням для автономного електротранспорту є використання комбінованого джерела електроживлення з паралельним з'єднанням акумулятора і СК. Суперконденсатор повинен забезпечувати запуск двигуна автомобіля і інші короткочасні (імпульсні) режими споживання великої потужності (зокрема, його розгін і підйом на піднесення, посилення низькочастотних звуків в аудіосистемі і т.п.), а акумулятор - тривале споживання електроенергії двигуном і іншим електроустаткуванням автомобіля без багаторазового збільшення споживаної потужності [10].

При заряді СК позитивно заряджені катіони в його електролітичному розчині рухаються до негативного електроду - катода, а негативно заряджені аніони - до позитивного електроду - анода. Таким чином, позитивні і негативні заряди накопичуються на кордоні розділу поверхонь обкладок СК (катода і анода) і електролітичного розчину і утворюють подвійний електричний шар.

При прикладанні більш високої напруги область накопичення зарядів в електродах СК розширюється за рахунок проникнення зарядів в їх розвинені нанопори меншого діаметру. Такий процес викликає збільшення накопичується в СК заряду, нелінійне щодо збільшення напруги. При розряді СК, навпаки, - позитивно заряджені катіони електролітичного розчину рухаються до анода, а негативно заряджені аніони - до катода [2].

Завдяки унікальним технічним характеристикам СК, насамперед високій питомій потужності, практично необмеженій кількості циклів заряд/розряд, роботі в широкому діапазоні температур, найперспективніші для них сфери застосування:

побутова електроніка - стільникові телефони, цифрові фотоапарати, слухові апарати тощо (для згладжування пікових навантажень і продовження цим терміну служби акумуляторів);

побутові і промислові електротехнічні пристрої - переносні електродрилі, портативні зварювальні апарати, джерела безперебійного живлення тощо.

автомобілебудування - гібридні автомобілі, електромобілі, системи старт-стоп [9];

Іоністори застосовуються в гібридній установці міських автобусів. Характерною особливістю даної установки є те, що в транспортному засобі використовуються два джерела живлення – двигун внутрішнього згоряння і накопичувач енергії. Комп'ютерне управління в фазі гальмування передає крутний момент на генератори, які заряджають іоністори. У момент руху автобуса або під навантаженням іоністори розряджаються, покращуючи динаміку руху і знижуючи витрату палива [1].

Одним з рішень є застосування суперконденсаторів (СК), які мають перевагу в порівнянні з АКБ при забезпеченні великих сплесків споживаної потужності завдяки їх високій питомій потужності і можливості швидкої зарядки. Отже, додавання СК до складу тягової системи ЕМ буде розвантажувати АКБ під час запуску електродвигуна (ЕД) і руху під ухил.

Алгоритм роботи:

при рівномірному русі електромобіля єдиним джерелом енергії є акумуляторні батареї;

при розгоні електромобіля потужність до коліс підводиться тільки від суперконденсатора; для внутрішньоміського ЕТ в разі повторного прискорення після набору постійної швидкості джерелом енергії є акумуляторні батареї, оскільки це пов'язано з певним обмеженням, що накладається на відношення маси гібридної енергоустановки до маси самого ЕМ; в разі реалізації комбінованої енергоустановки для електробуса і вантажного ЕМ при повторному прискоренні після набору постійної швидкості єдиним джерелом енергії є блок СК;

при гальмуванні електромобіля кінетична енергія руху рекуперується в СК, акумулятор не бере участі в процесі рекуперації;

при зниженні запасу енергії СК до критичного рівня відбувається його повна зарядка постійною потужністю від АКБ [3].

До складу перетворювача СК входить блок ПІ - регулятора, який обмежує і підтримує струм АКБ на заданому рівні шляхом зміни вихідної напруги перетворювача СК.

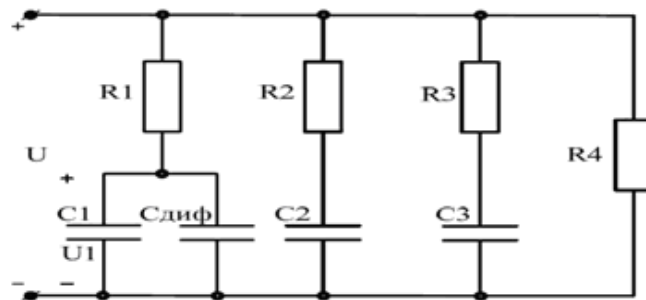


Рис. 3. Схема заміщення СК із трьома паралельними RC гілками

Схема досить точно відображає енергетичні і динамічні характеристики суперконденсаторів при тривалості перехідних процесів $\tau \leq 30$ хв і визначенні параметрів СК за результатами вимірювань на його затискачах.

Гілки схеми мають різні постійні часу $\tau = RC$ для отримання хорошої точності моделювання режимів роботи СК в зазначеному діапазоні часу.

Перша гілка складається з незмінних елементів R_1 і C_1 і елемента C_{diff} , значення якого залежить від напруги U на обкладинках СК. Її постійна часу $\tau_1 = R_1(C_1 + C_{diff})$ найменша, і її конденсатори C_1 і C_{diff} заряджаються за кілька секунд. Постійна часу другої гілки

$\tau_2 = R_2 C_2$ дорівнює декільком хвилинах, а в третій $\tau_3 = R_3 C_3 > 10$ хв. Для обліку саморозряду СК паралельно розглянутим гілкам додавався резистор R_4 , за допомогою якого враховувалися струми витоку СК і пов'язані з ними втрати електричної енергії [8].

Суперконденсатор допоможе при функціонуванні пристроїв, які в короткий проміжок часу споживають велику кількість енергії. Такі навантаження виникають, наприклад, при роботі серйозних аудіосистем або лебідки на позашляховому автомобілі. Такі ударні навантаження завдають шкоди АКБ. За рахунок більш низького внутрішнього опору і здатності приймати на себе імпульсну навантаження суперконденсатор забезпечує комфортний режим експлуатації для акумулятора і продовжить термін його служби [13].

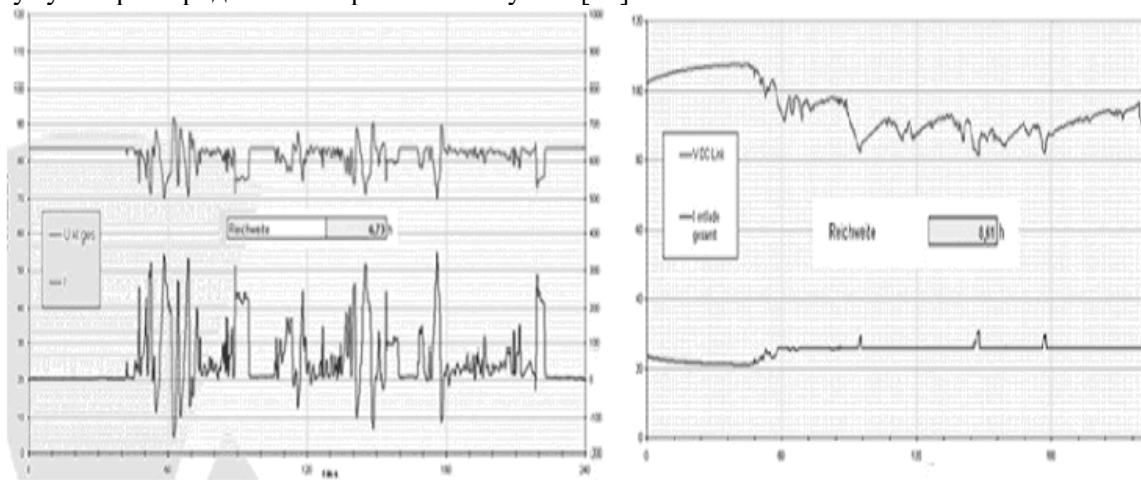


Рис.4. Струм та напруга АКБ без СК та із суперконденсатором

Ефект застосування:

- збільшення пускової потужності;
- зменшення струму А, збільшення терміну служби АБ;
- надійний пуск при значному зниженні ємності АБ;
- покращення якості напруги бортової мережі [12].

Висновки та напрямок подальших досліджень. Ємнісні накопичувачі можуть бути використані в системах динамічного навантаження електричних машин при їх випробуваннях. Застосування накопичувачів, встановлених в силовому ланцюзі між перетворювачем і електричної машиною, в перспективі дозволить вирішити проблему компенсації реактивної потужності, коливання якої негативно впливають на інших споживачів мережі і вимагають установки силового обладнання завищеною потужності. Тому побудова систем регулювання, енергетика приводу в режимі заряду-розряду - питання практичного застосування системи динамічного навантаження з ємнісним накопичувачем.

Таким чином, суперконденсатори вельми перспективна розробка тому вони здатні запасати стільки ж енергії, скільки зберігається в нікель - металогідридних батареях. Головна перевага запропонованого пристрою полягає в тому, що заряджати та розряджати воно може за лічені хвилини. Створений конденсатор володіє найбільш високою щільністю збереженої енергії серед усіх нановуглецевих пристроїв.

Енергозбереження в різних галузях із застосуванням суперконденсаторів:

- тягові підстанції (економія електроенергії 15 %, економія обслуговування 2 рази);
- електричний транспорт (економія електроенергії - 25 %, зниження навантаження на мережу - 15 %, автономне переміщення);
- гібридний транспорт (економія палива - 50 %, зниження емісії - 10 раз) [11].

Для набуття високих ємності й енергії матеріал повинен мати велику питому поверхню, доступну для частинок органічного електроліту. Для збільшення електропровідності (рухливості) електроліту в нанопорах електрода і зменшення, таким чином, внутрішнього опору СК необхідне певне співвідношення нанопор і транспортних каналів - головним чином макропор більших від 50 нм. При цьому нанопори обумовлюють високу ємність СК, а транспортні канали служать для швидкого введення/виводу заряджених частинок при заряді/розряді електрода; ма-

теріал повинен мати досить високу електронну провідність навіть без спеціальних струмопровідних добавок.

Список літератури

1. Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах: Учеб. пособие для электроэнергет. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
2. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов. Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
3. Щерба А.А., Третьяк М.В., Иващенко Д.С. Анализ переходных и установившихся электрических режимов аккумуляторной батареи и суперконденсаторов, включенных параллельно в системах питания электромобилей // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Силовая електроніка та енергоефективність. –2011. – Ч. 2. – С. 93–98.
4. Кузнецов, В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство [Текст] / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов, И. Востриков // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – С. 29 – 34.
5. Conway B. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. — New York: Kluwer Academic Plenum Publishers, 1999. — 698 p.
6. Beguin F., Frackowiak E. Supercapacitors: Materials, Systems and Applications. // First Edition, 2013. — Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. — 527 p.
7. Zubieta L., Bonert R. Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications // IEEE Trans. On Industry Applications. – Vol. 36. – No. 1, January-February 2000. – P. 199–205.
8. Ізотов В.Ю., Громадський Д.Г., Рудницька Г.А. Дослідження роботи суперконденсатора в рамках дволанкової RC-моделі // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 2. – С. 70–75.
9. Burke A., Miller M., Zhao H. Ultracapacitors in Hybrid Vehicle Applications: Testing of New High Power Devices and Prospects for Increased Energy Density // Research Report – UCD-ITS-RR-12-06. – Institute of Transportation Studies, University of California, May 2012.
10. Смотров, Е. А. Оптимизация процесса торможения в электроприводах малых электротранспортных средств. [Текст]. / Е. А. Смотров, Д. В. Вершини, В. Г. Герасимьяк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К. : Техніка, 2012. – №05(81). – С. 5–11.
11. Adam M. Ragheb and Magdi Ragheb. Wind Turbine Gearbox Technologies. University of Illinois at Urbana-Champaign, 216 Talbot Laboratory, USA. Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. 20, June, 2011, 422 p., pp. 189-206.
12. Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type) – Simulink Library Element. Matlab and Simulink 2014 Edition. The MathWorks, Inc.
13. Dudurych O., Conlon M. Impact of reduced system inertia as a result of higher penetration levels of wind generation. Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 6
14. Nikolic, D. ; Negnevitsky, M. ; de Groot, M. ; Gamble, S. ; Forbes, J. ; Ross, M. Fast demand response as an enabling technology for high renewable energy penetration in isolated power systems . PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE DOI: 10.1109/PESGM.2014.6939282 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 5.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 629.349:62-182

Ю.Б. ФІЛПП, канд. техн. наук, доц., А.В. БЕЛОУС, магістрант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІ ТРОЛЕЙБУСІВ КРИВОГО РОГУ

Визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути троллейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських троллейбусів. Підвищити енергетичну ефективність роботи тягового електроприводу можливо за рахунок використання енергії гальмування великовантажних кар'єрних самоскидів, застосувавши рекуперативне гальмування, як основний спосіб електричного гальмування. визначення енергетичних показників тягової підстанції в районі підстанції Ленинская-2, що обслуговує маршрути троллейбусів №3, 17 наукове обґрунтування і розробка методів розрахунку показників якості електроенергії, що дозволяють підвищити енергоефективність тягових підстанцій міських троллейбусів.

Ключові слова: підстанція, тяговий, енергетичні показники, потужність, троллейбус

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Найбільше зниження витрат електроенергії у міському електротранспорті можна забезпечити за рахунок підвищення ефективності роботи транспортних засобів. Втрати енергії в системі електропостачання електротранспорту сягають 25% загального обсягу електроенергії, що ним споживається.