

УДК 62-83-52

**В.А. Водичев**, д-р техн. наук,  
**В.А. Войтенко**, канд. техн. наук,  
**Є.О. Смотров**, канд. техн. наук

### АВТОМАТИЗОВАНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ

***Анотація.** Розглянуто мікропроцесорну систему керування електропривода змінного струму електротранспортного засобу. Наведено функціональну схему електроприводу, фрагменти схем управляючого і перетворюючого пристроїв, а також експериментальні механічні характеристики електроприводу. Стисло описана конструкція мотор-колеса і блоку управління.*

***Ключові слова:** електропривод, мікропроцесор, мотор-колесо, блок управління, функціональна схема.*

**В.А. Водичев**, д-р техн. наук,  
**В.А. Войтенко**, канд. техн. наук,  
**Е.А. Смотров**, канд. техн. наук

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

***Аннотация.** Рассмотрена микропроцессорная система управления электропривода переменного тока электротранспортного средства. Приведена функциональная схема электропривода, фрагменты схемы управляющего и преобразовательного устройств. А также экспериментальные механические характеристики электропривода. Сжато описана конструкция мотор-колеса и блока управления.*

***Ключевые слова:** электропривод, микропроцессор, мотор-колесо, блок управления, функциональная схема.*

**V. Vodichev**, ScD.,  
**V. Voytenko**, PhD.,  
**E. Smotrov**, PhD.

### AUTOMATED ELECTROMECHANICAL SYSTEM OF ELECTRIC VEHICLE

***Abstract.** The microprocessor control system of alternating current electric drive for electric vehicle is considered. The functional diagram of electric drive, fragments of charts of control and converter devices, and also experimental mechanical descriptions of electric drive, is resulted. Construction of motor-wheel and control block is briefly described.*

***Keywords:** electric drive, microprocessor, wheel motor, a control unit, a functional diagram.*

**Вступ.** Економічність електротранспортних засобів в значній мірі залежить від можливості застосування режиму рекуперації енергії гальмування з подальшим її використанням при русі електромобіля. У відомих дослідженнях запропоновано в електроприводі транспортного засобу в якості накопичувача енергії використовувати маховик [1]. Це обумовлює наявність додаткових втрат енергії, що пов'язано з додатковим перетворенням електричної енергії в механічну і навпаки, а також ускладнення силової частини і системи керування нею, у зв'язку з застосуванням додаткового автономного інвертора і

приводного двигуна маховика.

Застосування у легких засобах електротранспорту (ЛЗЕТ) електричних мотор – коліс (МК) на базі електричних двигунів з постійними магнітами на роторі дозволить спростити механічну частину ЛЗЕТ, відмовитися від коробки перемикачів швидкості і від головної механічної передачі автомобіля, що значно підвищить його економічність [2 – 5]. Застосування суперконденсаторів для накопичення електричної енергії виключає додаткове перетворення електричної енергії в механічну і підвищує ККД накопичувача енергії [6 – 9]. Проте практичні схеми таких електромеханічних систем у літературі розг-

© Водичев В. А., Войтенко В.А., Смотров Є.О., 2015

лянуті не достатньо.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка електротранспортного засобу для керування мотор-колесами з акумулюванням енергії гальмування у батареї конденсаторів для подальшого її використання при розгоні і русі транспортного засобу.

**Матеріали дослідження.** Функціональну схему автоматизованої електромеханічної системи багатодвигунного транспортного засобу наведено на рис. 1.

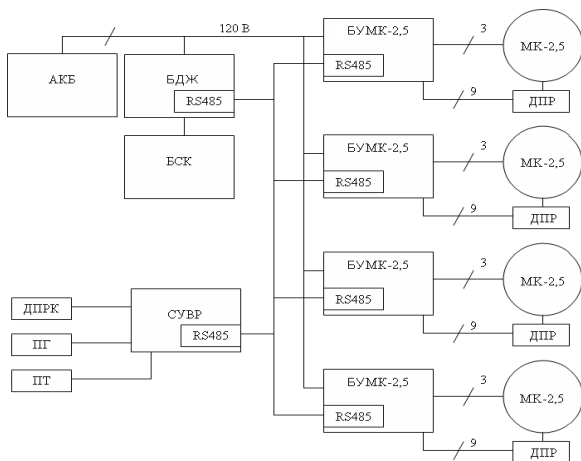


Рис. 1. Функціональна схема автоматизованої електромеханічної системи багатодвигунного транспортного засобу

Основні складові частини системи: акумуляторна батарея (АКБ), батарея суперконденсаторів великої ємності (БСК), бортове джерело живлення (БДЖ), система управління верхнього рівня (СУВР), датчик положення рульового колеса (ДПРК), педаль газу (ПГ), педаль гальмування (ПТ), чотири блоки управління мотор-колес потужністю 2,5 кВт (БУМК-2,5), чотири мотор-колеса потужністю 2,5 кВт (МК-2,5), чотири датчики положення ротора мотор-колес (ДПР).

АКБ містить запас електричної енергії, яку споживають МК. Запас енергії в АКБ частково поповнюється при гальмуванні ЛЗЕТ. БСК необхідна для накопичення електричної енергії, що генерується всіма МК під час гальмування ЛЗЕТ і потім споживається МК при русі ЛЗЕТ. Таким чином, завдяки застосуванню АКБ і БСК заощаджується енергія гальмування ЛЗЕТ. БДЖ регулює подачу електричної енергії в БУМК від АКБ і БСК і

в зворотному напрямі таким чином щоб використовувати і накопичувати енергію електромеханічної системи з найменшими втратами. На базі сигналів завдання, що надходять від органів керування ДПРК, ПГ, ПТ система управління верхнього рівня формує сигнали повороту передніх колес, а також сигнали завдання швидкості і максимального моменту для всіх МК. Ці сигнали з виходу СУВР надходять на входи БУМК через інтерфейс RS485. Функціональну схему БУМК-2,5, яка є двоконтурною системою регулювання швидкості МК, наведено на рис. 2.

Система регулювання швидкості МК реалізується програмно, на базі спеціалізованого сигнального процесора TMS320LF2406. По інтерфейсу RS485 від СУВР в БУМК-2,5 надходять сигнал дозволу роботи, сигнал завдання швидкості і сигнали завдання обмеження струму розгону і гальмування. В свою чергу від БУМК-2,5 в СУВР і в систему індикації надходять сигнали зворотного зв'язку за швидкістю і за струмом, а також інформація про стан пристроїв захисту і діагностики. Сигнали завдання швидкості і обмеження струму передаються на задавачі інтенсивності зміни швидкості (ЗІШ) і струму при розгоні і гальмуванні (ЗІС1, ЗІС2). Роздільне управління рівнями обмеження струму при розгоні і гальмуванні дозволяє керувати електричним гальмуванням ЛЗЕТ з рекуперацією енергії в АКБ і в БСК.

Сигнал завдання швидкості, що формує ЗІШ, порівнюється з сигналом оцінки фактичної швидкості, їх різниця надходить на вхід регулятора швидкості (РШ). З виходу РШ сигнал завдання струму надходить на блок обмеження струму (БОТ), котрий, відповідно до поданих на нього сигналів із ЗІС1 і ЗІС2, обмежує значення сигналу на виході РШ «зверху» и «знизу». Далі сигнал завдання струму надходить на суматор, де від нього віднімається сигнал зворотного зв'язку за струмом. Сигнал похибки регулювання струму надходять на вхід регулятора струму (РС), а з виходу останнього – на вхід широтно-імпульсного перетворювача (ШІМ), котрий відповідно з сигналами від датчика положення ротора (ДПР) формує широтно-модульовані сигнали управління транзисто-

рними ключами автономного інвертора на- обмотки статора синхронного двигуна МК.  
 пруги (АІН). АІН здійснює комутацію фаз

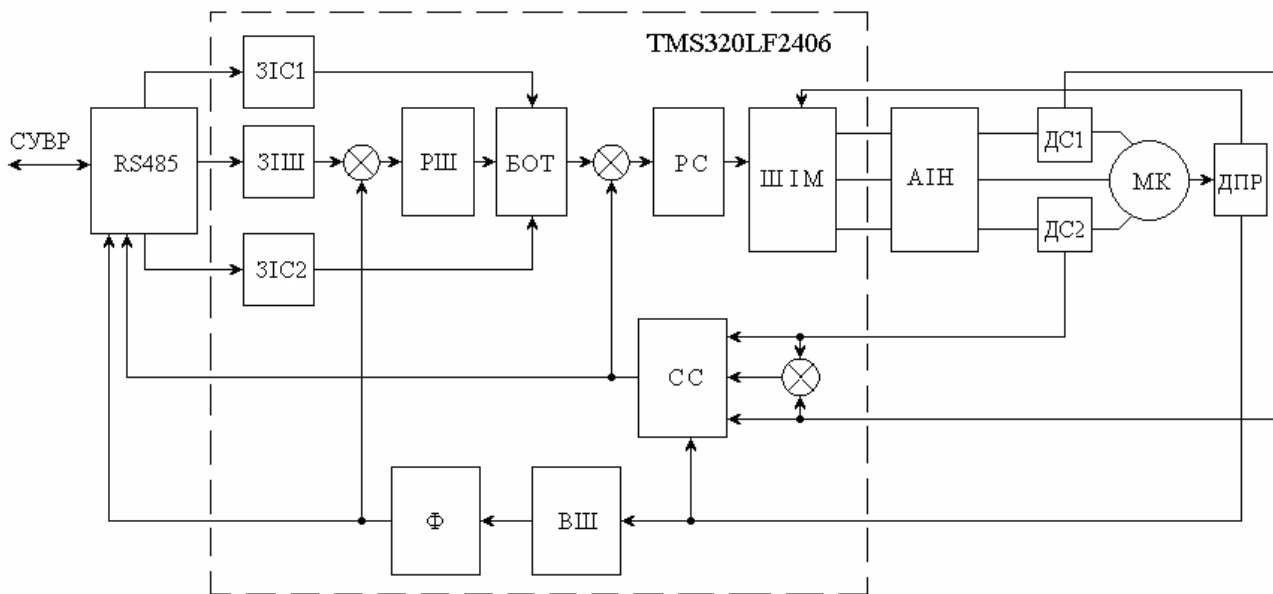


Рис. 2. Функціональна схема БУМК-2,5

Оцінка значення струму в двох фазах обмотки статора здійснюється за допомогою двох датчиків струму ДС1 і ДС2, а значення струму в третій фазі визначається за допомогою підсумовуючого пристрою відповідно до першого закону Кірхгофа. Вихідні сигнали датчиків струму надходять на селектор струму (СС), котрий відповідно до сигналів від ДПР визначає напрям моменту, що розвиває синхронний двигун, і формує сигнал зворотного зв'язку за струмом (ЗЗС). Останній надходить на вхід суматора, який включено на вхід регулятора струму. Також сигнал ЗЗС надходить через блок RS485 в СУВР. Сигнал з виходу ДПР надходить на вхід блоку (ВШ), що розраховує значення сигналу зворотного зв'язку за швидкістю (ЗЗШ). Завдяки особливості конструкції МК-2,5 і ДПР сигнал ЗЗШ має високий рівень перешкод, тому він надходить на вхід адаптивного фільтра (Ф), де проводиться його фільтрація. З виходу Ф сигнал надходить на вхід суматора, розташованого на вході РІІ, і замикає від'ємний зворотний зв'язок за швидкістю. Окрім цього сигнал ЗЗШ надходить через блок RS485 в СУВР.

Перетворюючий пристрій блоку управління БУМК-2,5 є трифазним АІН, зібраним

на польових транзисторах IRFP4668 (VT1 – VT18). На рис. 3 показана схема, що формує напругу на фазі А обмотки статора синхронного двигуна. На вході перетворюючого пристрою включено імпульсні підсилювачі, виконані на інтегральних комплементарних польових транзисторах IRF7309. Застосування імпульсних підсилювачів, які розташовані поблизу затворів транзисторів силових ключів, забезпечує мінімізацію шляху протікання струму до затвора польових транзисторів і мінімізує паразитні параметри ланцюга затвора. Це дозволяє досягти високої швидкості перемикачів силового каскаду і внаслідок цього зменшити втрати енергії на перемикачів в польових транзисторах. Для обмеження комутаційних стрибків напруги при закритті силових транзисторних ключів використовуються пасивні фільтри, реалізовані на резисторах R14, R15, конденсаторах C7, C17 і діодах VD1, VD9. Для захисту силового ключа від перенапруження застосовуються стабілітрони VD2, VD8, типу 1,5KE180CA. Для відключення перетворюючого пристрою від бортового джерела живлення (БДЖ) при спрацьовуванні одного з аварійних пристроїв захисту використовуються реле типу RP3SL024 (на рис.

3 не показано). Для отримання інформації про значення струму у фазах МК використовуються датчики струму ДТ1 і ДТ2 типу HAS50P/SP1, які побудовані на ефекті Хола.

Устрій МК, розробленого фахівцями ЗАТ НПП «Інкар», наведено в [10].

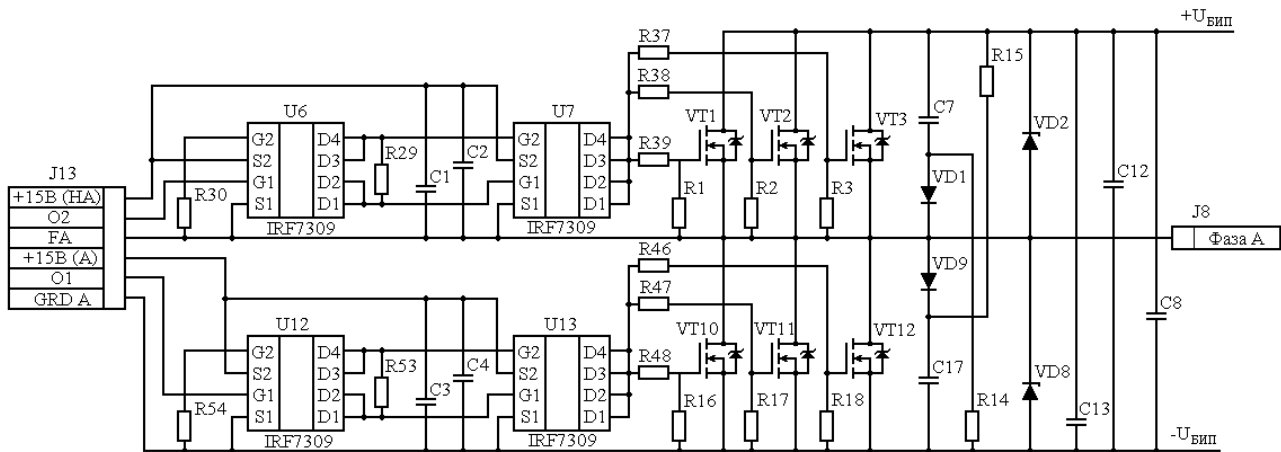


Рис. 3. Схема АІН (фаза А)

На нерухомому щодо корпусу електромобіля статорі знаходиться трифазна обмотка. Диск колеса сполучено з ротором, на якому встановлено постійні магніти. Усередині ротора встановлено механічне гальмо. Таким чином, МК являє собою трифазний синхронний двигун із збудженням від постійних магнітів.

Для отримання інформації про кут повороту ротора щодо статора синхронного двигуна і про швидкість обертання МК в електроприводі використовується дев'ять дискретних датчиків магнітного поля, які встановлено в робочому зазорі на статорі. На статорі МК також розташована трифазна обмотка на 8 пар полюсів. Схема обробки сигналів, що надходять від датчиків положення, формує 72 імпульси за один оберт МК. По тривалості інтервалів часу між передніми і задніми фронтами імпульсів розраховується оцінка значення швидкості обертання МК. Зі встановлених дев'яти дискретних датчиків магнітного поля три датчики використовуються як датчики положення ротора (ДПР). Живлення датчиків магнітного поля здійснюється від електрично-ізолюваного джерела напругою 9 В, що входить до складу БУМК-2,5, чим досягається висока перешкодостійкість ДПР.

Джерело живлення схеми управління виконано з використанням імпульсного трансформатора, на виході якого формуються

декілька імпульсних сигналів частотою 20 кГц і напругою 24 В – для живлення реле, 9 В – для живлення схеми управління і 12 В – для живлення датчиків магнітного поля. З вторинних обмоток імпульсного трансформатора відповідна напруга надходить на випрямлячі і далі – на стабілізатори напруги (мікросхеми LM7815, LM7809, LM7805 і LM317). На виходах стабілізаторів напруга стабілізується на рівні 15 В – для живлення драйверів і ланцюгів затворів силових транзисторних ключів, 9 В – для живлення магнітних датчиків, 5 В – для живлення схем логіки БУМК-2,5 і 3,3 В – для живлення процесора. При зниженні напруги на виході БДЖ до 70 В джерело живлення схеми управління відключається, чим виключає можливість роботи управляючого і перетворюючого пристроїв при зниженій напрузі живлення.

Для обміну інформацією з системою індикації і з пристроєм завдання основних параметрів руху (напряму, швидкості, обмеження струму) в БУМК-2,5 використовується інтерфейс RS485. Як драйвер інтерфейсу використана інтегральна мікросхема MAX1480A, яка окрім узгодження рівнів напруги сигналів забезпечує електричну ізоляцію ланцюгів процесора і інтерфейсу.

На рис. 4 показано експериментальні механічні характеристики, що відповідають роботі БУМК-2,5 в режимі обмеження струму

при значеннях сигналу завдання струму 10 А (графік 1), 25 А (графік 2) і 50 А (графік 3) при заданій частоті обертання МК  $n_{\phi}=125$  об/хв.

Експериментальні дослідження показали, що БУМК-2,5 дозволяє здійснити плавне регулювання струму від 0 А до 80 А. При цьому момент, що розвиває МК, плавно регулюється від 0 Нм до 160 Нм. Це важливо для точного розподілу рушійного моменту між мотор-колесами на поворотах ЛЗЕТ та при русі коліс по ґрунту з різним коефіцієнтом зчеплення.

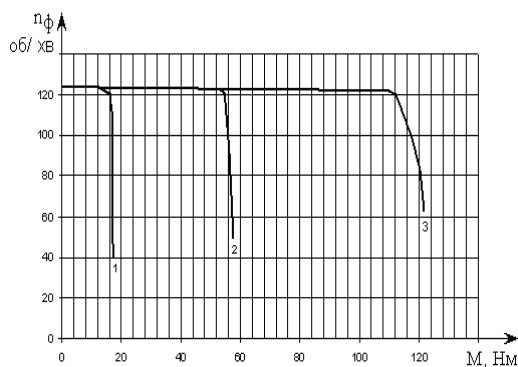


Рис. 4. Механічні характеристики БУМК-2,5 в режимі обмеження струму

На рис. 5 показано експериментальні механічні характеристики замкненої системи електропривода в режимі регулювання швидкості при значеннях сигналу завдання швидкості 30 об/хв (графік 4), 75 об/хв. (графік 3), 150 об/хв. (графік 2) і 300 об/хв. (графік 1). Експериментальні дослідження показали, що БУМК-2,5 дозволяє здійснити плавне регулювання швидкості в діапазоні 30:1. Це важливо для здійснення плавного руху ЛЗЕТ на малій швидкості.

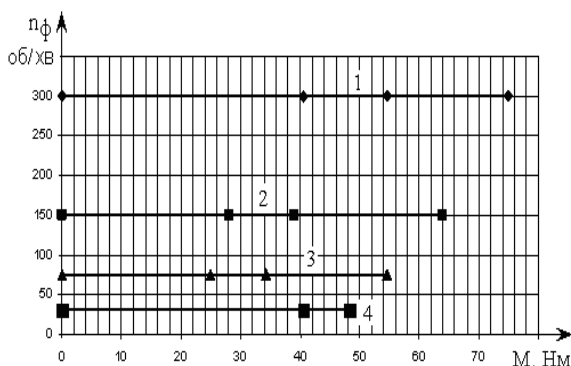


Рис. 5. Механічні характеристики БУМК-2,5 в режимі регулювання швидкості

На рис. 6 показано експериментальні графіки залежності ККД електропривода від моменту навантаження МК при різних значеннях напруги на виході АКБ, з яких випливає, що в зоні малого навантаження МК (менше 20 Нм) ККД знаходиться в межах від 50% до 80% і значно залежить від значення напруги АКБ. Причому, чим менше значення напруги на виході АКБ, тим більше значення ККД. Це означає, що при розряді АКБ накопичена в ній електрична енергія використовується більш ефективно. При навантаженні МК-2,5 від 23 Нм до 83 Нм ККД електропривода перевищує 80% і майже не залежить від значення напруги АКБ.

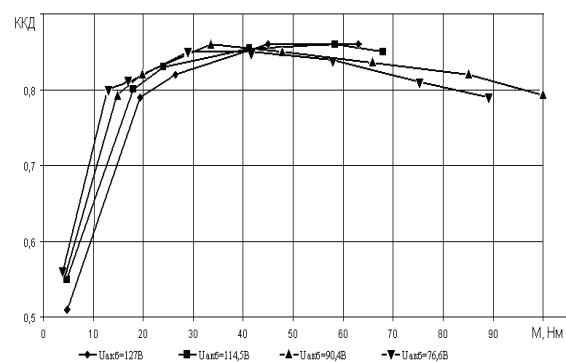


Рис. 6. Графіки залежності ККД від моменту навантаження МК при різних значеннях напруги на виході БДЖ

Конструктивно блок управління БУМК-2,5 поділено на дві частини: блок перетворюючого пристрою (силовий блок) і блок управляючого пристрою (відсік управління). У силовому блоці розташовано силові транзистори, конденсатори вхідного фільтру силового джерела живлення і датчики струму. Силовий блок відокремлено від відсіку управління металевим екраном, який призначено для послаблення впливу на управляючий пристрій перешкод, що створює перетворюючий пристрій. Всі металеві частини БУМК-2,5 електрично-сполучені з корпусом ЛЗЕТ. Електричні ланцюги перетворюючого пристрою і управляючого пристрою БУМК-2,5 електрично-ізолювані від корпусу. Блок БУМК-2,5 потребує вертикальної установки (по ребрах радіатора) і закріплення на поверхні з використанням теплопровідної пасти, що забезпечує більш ефективно відведення

тепла і зниження температури транзисторних ключів при однаковій потужності на виході БУМК-2,5.

**Висновки.** На підставі викладеного можна зробити наступні висновки.

1. Розроблено автоматизовану електро-механічну систему ЛЗЕТ з трифазним АІН і мікропроцесорним блоком управління синхронним двигуном, який забезпечує плавне регулювання швидкості і моменту, що розвиває МК. Управління всіма МК ЛЗЕТ здійснюється через послідовний інтерфейс RS485.

2. Завдяки можливості здійснити незалежне управління кожним з коліс значно спрощується реалізація складних алгоритмів управління, необхідних для оптимізації роботи анти-блокувальних і анти-пробуксовочних систем.

3. Застосування МК спрощує кінематику ЛЗЕТ, підвищує економічність. Електротранспортний засіб стає набагато простішим і дешевшим в експлуатації, оскільки містить менше механічних вузлів. Процес розгону електротранспортного засобу здійснюється плавно без перемикання коробки передач.

### Список використаної літератури

1. Будніков В.М. Гібридна система електроживлення з інерційним накопичувачем енергії для спеціалізованих видів транспорту: Автореф. дис.. канд. техн. наук: 05.09.03/ Кременчуцький держ. політехніч. ун-т ім. М. Остроградського. – Кременчук, 2009. – 18 с.

2. Wei H. a. Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor based on double current regulators [Text] / [H. a Wei, P. a Li, G. b Liu and others]. - Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) //Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 31 (6).-2010.-P. 691 -694. DOI : 10.3969/j.issn.1671-7775. 2010. 06. 016.

3. Vitols K. PID regulator implementation for electric kart DC motor current stabilization [Text] / K. Vitols, N. Reinberg, I. Galkin // Elektronika ir Elektrotechnika. - 2012. -P. 7-10. DOI: 10.5755/j01.eee.l19.3.1353.

4. Bernat J. Application of optimal current driver for the torque control of BLDC motor

[Text] / J. Bernat, S. Stepien //Archives of Electrical Engineering, 60 (2). - 2011. - P. 149- 158. DOI : 10.2478/v10171-011-0014-7.

5. Ozturk S. B. a. Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor [Text] / S. B. a Ozturk, H. A. b Toliyat //IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 16 (2), art. no. 5438764.-2011. P. 351-360. DOI : 10.1109/TMECH.2010.2043742

6. Вершинин Д. В. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства [Текст]/Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // Электромашинобуд. та електрооблад. – Киев: –2008.–Вип. 71.– С. 5–11.

7. Вершинин Д. В. Визначення параметрів основних вузлів електричної схеми електробуса [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Є. О. Смотров // Электромашинобуд. та електрооблад. – Киев: – 2009. – Вип. 74. – С. 10 – 17.

8. Вершинин Д. В. Визначення вимог до енергетичних параметрів електроприводу мотор-коліс електробуса [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, О. Г. Дашко, Є. О. Смотров // «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, №28. – С. 303 – 304.

9. Войтенко В. А. Оптимізація параметрів конденсаторної батареї автономного джерела живлення електропривода електромобіля. [Текст] / В. А. Войтенко, В. А. Водичев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 3/2012 (19). – С. 261 – 263.

10. Вершинин Д.В. / Электропривод мотор-колеса электротранспортного средства. [Текст] / Вершинин Д.В., Войтенко В.А., Смотров Е.А., Николенко А.Н, Процорова Н.А. // Электромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка. – 2009. – Вип. 74. – С. 25 – 30.

Получено 20.11.2015.

## References

1. Budnicov V.M. Gibridna sistema elektroživlenya z inerciynim nacopichyvachem energii dla specializovanih vidiv transport [The hybrid power system with inertia energy storage for special types of transport], (2009), Avtoref. dis. kand. tehn. nauk: 05.09.03, Kremenchuckiy derj. politechnich. Un-t im. M. Ostrogradscogo. – Kremenchuk, 18 s. (in Ukrainian).

2. H. a Wei, P. a Li, G. b Liu and others Commutation torque ripple re-duction in brushless DC motor based on double current regulators, (2010), Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban) //Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 31 (6), pp. 691 -694. DOI : 10.3969/j.issn.1671-7775. 2010. 06. 016.

3. K. Vitols, N. Reinberg, I. Galkin PID regulator implementation for electric kart DC motor current stabilization, (2012), El-ektronika ir Elektrotehnika, pp. 7-10. DOI: 10.5755/j01.eee.ll9.3.1353.

4. J. Bernat, S. Stepien Application of optimal current driver for the torque control of BLDC motor, (2011), Archives of Electrical Engineering, 60 (2), pp. 149- 158. DOI : 10.2478/v10171-011-0014-7.

5. S. B. Ozturk, H. A. Toliyat Direct torque and indirect flux control of brushless DC motor, (2011), IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 16 (2), art. no. 5438764, pp. 351-360. DOI : 10.1109/TMECH.2010.2043742

6. Vershinin D. V., Vodichev V. A., Voytenko V. A., Smotrov E.A. Osobenosti vibora parametrov bortovogo istochnika pitaniya elektrotransportnogo sredstva [Features of choice of parameters of side source of feed of electromobile], (2008), Electromachinobuduvaniya ta Electroobladneniya Publ., Kiev, Ukraine, Vol. 71, pp. 5-11 (in Russian).

7. Vershinin D. V., Voytenko V. A., Smotrov E.A. Vznacheniya parametriv osnovnih vuzliv elektrichnoyi shemi elektrobusa [Determination of parameters of basic knots of the electric chart of electro bus], (2009), Electromachinobuduvaniya ta Electroobladneniya Publ., Kiev, Ukraine, Vol. 74, pp. 10-17 (in Ukrainian).

8. Vershinin D. V., Vodichev V. A., Voytenko V. A., Dashko O.G., Smotrov E.A. Vznacheniya vimog do energetichnih paramet-

riv elektroprivodu motor-kolis elektrobusa [Determination of requirements to the power parameters of electric drive of motor-wheels of electro bus], (2010), «Problemi automatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i practika». Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «Kharkivskiy politechnichiy institute» Publ., Kharkov, Ukraine, Vol. 28, pp. 303 - 304. (in Ukrainian).

9. Voytenko V. A., Vodichev V. A. Optimizatsiya parametriv kondensatornoyi batareyi avtonomnogo dzerela zivlenia elektroprivodu elektromobilia [Optimization of parameters of condenser battery of autonomous source of feed of electric drive of electromobile], (2012), Electromechanichni i energozberigayuchi sistemi. Thematicniy vipusk «Problemi automatizovanogo elektroprivoda. Teoriya i practika» naukovovo-virobnichogo zurnalu Publ., Kremenchuk, Ukraine, Vol. 3/2012 (19), pp. 261 - 263 (in Ukrainian).

10. Vtrshinin D.V., Voytenko V. A., Smotrov E.A., Nicolenco A.N, Procerova N.A. Elektroprivod motor-kolesa elektrotransportnogo sredstva. [The electric drive of motor-wheel of electric vehicle], (2009), Electromachinobuduvaniya ta Electroobladneniya Publ., Kiev, Ukraine, Vol. 74, pp. 25-30 (in Russian).



Водічев Володимир Ана-  
толійович,  
д.т.н., проф., зав. каф.  
ЕМСКУ ОНПУ, 65044, м.  
Одеса, пр. Шевченка, 1,  
(048) 705-84-67,  
E-mail: [vva@eei.opu.ua](mailto:vva@eei.opu.ua)



Войтенко Володимир Ан-  
дрійович,  
к.т.н, доц., доц. каф.  
ЕМСКУ ОНПУ, 65044, м.  
Одеса, пр. Шевченка, 1,  
(048) 705-84-67,  
E-mail: [radist\\_89@bk.ru](mailto:radist_89@bk.ru)



Смотров Євген Олександр-  
рович,  
к.т.н., зав. сектором Оде-  
ського СКБ спеціальних  
верстатів, 65044, м. Одеса,  
пр. Гагаріна, 25,  
(048) 728-85-05  
E-mail:  
[ukrniisip@gmail.com](mailto:ukrniisip@gmail.com)