

УДК 621.313.17

Г. В. КУЛИНЧЕНКО, А. М. МАСЛЕННИКОВ, В. А. БАГУТА, А. А. ДУНЕВ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ ДВИГАТЕЛЯ С КАТЯЩИМСЯ РОТОРОМ

Проанализированы основные факторы, обеспечивающие увеличение вращающего момента двигателя с катящимся ротором. На основе выбранного направления исследований сформулированы требования к системе управления двигателем. Разработанная схема управления позволяет оптимизировать параметры электропривода запорно-регулирующей арматуры. Полученные результаты показали улучшение динамических показателей электропривода на основе двигателя с катящимся ротором.

Ключевые слова: магнитная система, двигатель с катящимся ротором, система управления, широтно-импульсная модуляция.

Введение. Основная тенденция развития электропривода проявляется в удовлетворении следующих требований:

- заданная точность позиционирования и необходимая скорость изменения положения рабочего органа;

- работа в пограничных режимах;

- постоянная скорость при переменной нагрузке;

- широкий диапазон регулирования по скорости и крутящему моменту.

Большая часть систем электроприводов переменного тока, которая используется в запорно-регулирующей арматуре (ЗРА), стрелочных железнодорожных переводах и прочих подобных устройствах морально устарела. Это связано с традиционным применением релейной автоматики для управления этим электроприводом. Контроль положения запорного органа осуществляется при помощи концевых выключателей, а для ограничения вращающего момента применяются кулачковые или фрикционные муфты.

Более эффективное управление обеспечивается в результате использования преобразователей частоты со скалярной системой управления. Однако такие схемы не обеспечивают возможности прямого управления моментом, имеют низкую точность и недостаточные динамические показатели, вследствие чего наблюдаются вариации регулируемых потоков жидкостей или газов, неконтролируемые ударные нагрузки на уплотнительные поверхности.

Одним из перспективных направлений построения подобного электропривода представляется использование вентильных двигателей и двигателя с катящимся ротором (ДКР). Система управления этих двигателей позволяет с высокой степенью точности позиционировать положение ротора и регулировать вращающий момент. В отличие от асинхронного двигателя, который используется в сочетании с механическим редуктором для решения сформулированных задач, ДКР позволяет совместить в себе функции электродвигателя и редуктора[1].

Поскольку большинство систем управления не обеспечивает в полной мере выполнения требований, предъявляемых к средствам автоматизации электропривода ЗРА, то актуальной задачей совершенствования параметров электропривода является комплексный подход к разработке

аппаратно-программных модулей системы управления электропривода ЗРА.

Поиск компромиссов по реализации программной и аппаратной части модуля осуществляется на основании информации о характеристиках рабочего органа, так как именно эта информация позволяет получить эффективные режимы функционирования электропривода.

Цель исследований. Анализ факторов, определяющих преобразование электромагнитной энергии в ДКР для создания эффективной системы управления двигателем, обеспечивающей получение максимального вращающего момента при заданных конструктивных параметрах.

Материалы исследований. Комплекс требований, которые обеспечивают надежность функционирования электропривода ЗРА, напрямую или косвенно определяется динамическими характеристиками используемого двигателя. При этом универсальным динамическим показателем электродвигателя, характеризующим быстродействие ДКР, является его приемистость П [2]:

$$П = M_r^2 / J_p, \quad (1)$$

где M_r – вращающий момент ДКР;

J_p – момент инерции ротора ДКР.

Откуда видно, что перспективы улучшения динамических показателей электропривода определяются возможностями повышения величины вращающего момента двигателя, поскольку минимизация момента инерции ротора ДКР ограничена конструктивными возможностями.

Момент двигателя зависит не только от геометрических параметров двигателя, но и от значения индукции поля в воздушном зазоре ДКР[1]:

$$M_r = k \cdot d_r^2 l_s k_z B_{\delta m}^2 \sin \theta \quad (2)$$

где θ – угол нагрузки;

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от схемы обмотки;

d_r – диаметр ротора;

l_s – активная длина сердечника ротора;

k_z – относительная ширина зубца;

$B_{\delta m}$ – максимальное значение индукции в воздушном зазоре.

Таким образом, задача достижения приемлемых динамических показателей электропривода путем

повышения вращающего момента ДКР сводится к получению требуемых значений магнитной индукции в воздушном зазоре ДКР (рис. 1). Распределение значений магнитной индукции зависит от длины воздушного зазора, который определяется разностью диаметров статора и ротора, свойствами материала магнитной системы двигателя и величиной МДС, создаваемой обмоткой статора:

$$B_{\delta} = \frac{2 \cdot F_{\delta} \cdot \mu_0}{(d_s - d_r) \cdot (1 - \cos \alpha)},$$

где F_{δ} – МДС воздушного зазора в радиальном направлении;

d_s – диаметр статора;

α – угловая координата, определяющая радиальное значение длины воздушного зазора.

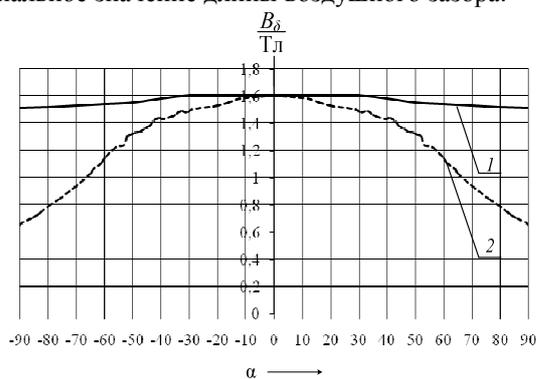


Рис. 1 – Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре при равных МДС обмотки статора, но различных величинах разности диаметров статора и ротора:
1 – при 0,1 мм; 2 – при 1 мм.

На значение вращающего момента ДКР также влияет и степень насыщения магнитопровода. Магнитная система двигателя проектируется таким образом, чтобы рабочее значение магнитной индукции находилось на «колене» кривой намагничивания. Исходя из этого, магнитная система обладает некоторым запасом по увеличению значения магнитной индукции, но работать постоянно в режиме перенасыщения магнитопровода оказывается не целесообразно по ряду известных причин. В частности, следует учитывать, что общее перенасыщение магнитопровода приводит к увеличению потоков рассеивания и, как следствие, к увеличению тормозных моментов, которые снижают вращающий момент двигателя [3].

Известно, что помимо тока обмотки статора, обеспечивающего величину магнитной индукции в воздушном зазоре, значение МДС повышается при увеличении числа витков обмотки. Однако увеличение числа витков обмотки ограничено, во-первых, конструктивными соображениями, а во-вторых, возрастанием индуктивности обмотки, а значит и постоянной времени. Таким образом, наиболее приемлемым способом увеличения момента ДКР остается увеличение тока обмотки статора.

Тем не менее, очевидность такого вывода не дает ответа на вопрос о способе управления током обмотки, поскольку значения тока, используемого для создания магнитного поля двигателя, также

ограничены конструктивными соображениями и электрическими параметрами обмотки статора.

Поскольку стандартные методы не позволяют достичь желаемых результатов, то для получения требуемого распределения индукции поля ДКР во времени используется программно управляемая микропроцессорная система коммутации токов в обмотках двигателя.

Реализация схемы управления токами обмоток. Классическая схема управления коммутацией обмоток ДКР базируется на импульсном распределителе напряжения, который преобразует последовательность импульсов управления, следующих с заданной частотой коммутации, в m -фазную систему (по числу обмоток) однополярных импульсов напряжения. Усиленные импульсы управляют временем переключения коммутатора обмоток, который подключен к двигателю и запитан от источника тока.

В силу упомянутых конструктивных причин такая схема при заданной индуктивности и сопротивлении обмоток не может обеспечить как высокие динамические свойства и энергетические показатели (КПД), так и возможности увеличения вращающего момента ДКР.

В усовершенствованных схемах управления коммутацией обмоток двигателя [4] вводятся регуляторы тока обмотки $I_{зад}$, использующие широтно-импульсную модуляцию импульсов (ШИМ) на основе сигналов обратной связи по току. Структурная схема управления коммутацией обмоток ДКР представлена на рис. 2.

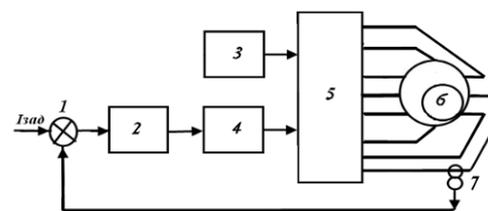


Рис.2 – Структурная схема управления коммутацией обмоток ДКР:

- 1 – блок сравнения; 2 – ШИМ-регулятор тока;
3 – источник питания обмоток; 4 – распределитель импульсов управления; 5 – коммутатор обмоток;
6 – ДКР; 7 – датчик тока.

Рассмотренная схема управления без особых сложностей реализуется на базе различных микроконтроллеров, за исключением силового блока коммутации 5, содержащем мостовую схему включения силовых транзисторов, что позволяет изменять направление тока на противоположное, тем самым размагничивая магнитопровод. Кроме силовых транзисторов в схеме приходится использовать снабберы (RC – цепочки, или полупроводниковые быстродействующие варисторы, для шунтирования выбросов коммутационных токов), которые увеличивают надежность коммутации и уменьшают динамические потери [5]. Другой особенностью схемы управления является источник питания обмоток 3, обеспечивающий необходимую динамику переключений.

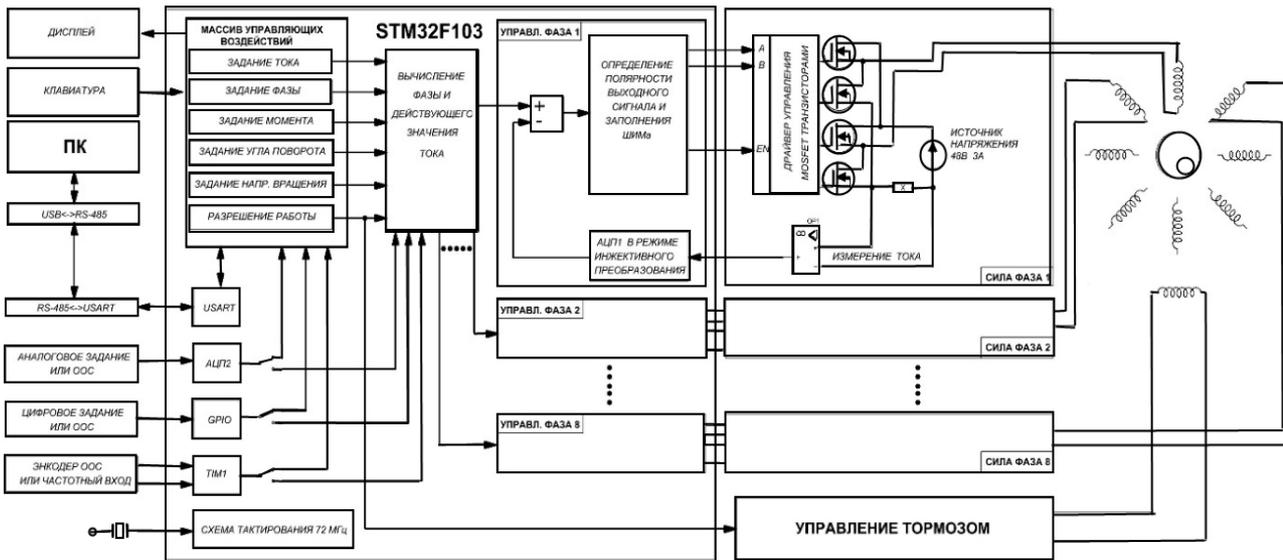


Рис. 3– Функциональная схема системы управления ДКР

Требования высоких динамических параметров к источнику обусловлены характером переключений, когда параметры нагрузки (обмотки) изменяются в результате переходного процесса от комплексного до чисто активного.

Один из вариантов построения микроконтроллерной системы управления ДКР (СУДКР), позволяющей использовать различные методы управления двигателем, изображен на рис. 3. Управление реализовано на основе микроконтроллера STM32, использующего 32-битное ядро ARM Cortex-M3 и характеризуется возможностями генерации ШИМ-сигналов и совместной работы с АЦП [5].

К числу особенностей микроконтроллеров STM32, которые важны для реализации систем управления электродвигателем, относятся:

- высокоэффективная архитектура процессора, которая позволяет за небольшое время реализовать сложные алгоритмы управления;
- многофункциональный таймер для генерации паузы перекрытия (исключает протекание кратковременного сквозного тока в двухтактном силовом каскаде).

СУДКР позволяет реализовать движение двигателя с заданной скоростью, заданным моментом, поворот на заданный угол, как без обратной связи (ОС), так и с использованием ОС.

При использовании возможностей ввода посредством интерфейса RS-485 задания значения и закона управления током обмотки с персонального компьютера (ПК), приведенная схема позволяет реализовать СУ стендом для испытаний динамических и статических характеристик ДКР (рис. 4).

В зависимости от конфигурации СУДКР данные с входов контроллера записываются либо в массив управляющих воздействий, либо передаются в блок вычисления фазы и действующего значения тока, где происходит вычисление необходимого выходного воздействия. Задание величины тока передается в программный блок «управления фазой m », где из него вычитается измеренный ток. В зависимости от

результата вычитания определяется необходимая пара коммутационных ключей для открытия и вычисляется длительность импульса ШИМ.

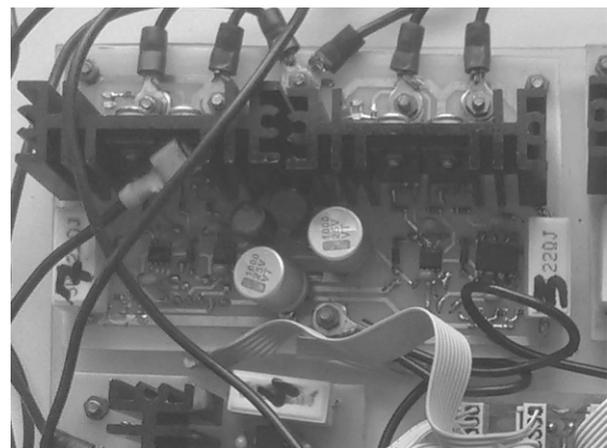


Рис.4 – Макет микроконтроллерной СУДКР

Измерение тока выполняется двумя встроенными 12-ти битными АЦП последовательного приближения, сконфигурированными на выполнение инжективных преобразований, с прямой передачей результатов преобразования в память DMA (Direct Memory Access), при этом ядро микроконтроллера не загружено соответствующими операциями, его ресурсы можно использовать для других задач. Передача данных (транзакции) между периферийными модулями и/или памятью идет абсолютно независимо от ядра микроконтроллера.

Для обеспечения достоверных результатов измерения тока, напряжение, снимаемое с шунта, усиливается и фильтруется с помощью аналогового фильтра Чебышева 2-го порядка.

В состав схемы силовой части управления фазой входит драйвер управления силовыми транзисторами, две пары силовых транзисторов MOSFET, источник питания, шунт, и усилитель, совмещенный с фильтром высоких частот.

Для надежного и качественного переключения управляющих силовых ключей – высоковольтных *MOSFET* – необходимо обеспечить выполнение ряда условий:

1) напряжение на затворе должно быть выше напряжения истока транзистора на 5...10В;

2) транзисторный ключ должен иметь возможность прямого управления от логической низковольтной части системы, измеряемого относительно общей шины;

3) мощность, потребляемая схемой управления затвором ключа, не должна существенно влиять на общую производительность системы коммутации.

Основной задачей драйвера, обеспечивающей указанные выше требования, является согласование уровней низковольтной части системы управления, имеющей однополярное питание с уровнем высоковольтной части, к которой часто приложено двуполярное напряжение с высоким потенциалом.

Второй задачей, решаемой с помощью специализированных драйверов, является обеспечение высоких значений токов затвора, переключающих силовые транзисторы. Дело в том, что высоковольтные силовые ключи, как правило, имеют значительные паразитные емкости, способные накапливать большие заряды в области затвора. Для полноценного переключения таких транзисторов необходимо обеспечить условия рассасывания или накопления заряда, что и реализуется с помощью больших выходных токов драйвера.

Кроме того, драйверы силовых ключей, в отличие от классических преобразователей уровня, снабжены механизмами защиты, как самого драйвера, так и управляемых ключей, что позволяет выполнять формирование выходных управляющих сигналов согласно алгоритмам, предотвращающих выход системы из строя в аварийной ситуации.

СУДКР имеет дополнительный канал управления электромагнитным тормозом. При поступлении команды на вращение двигателя, подается повышенное напряжение срабатывания на катушку, по истечении времени срабатывания напряжение понижается, до напряжения удержания. Что позволяет, снизить потребляемый ток системой, и нагрев катушки. При срыве синхронизации ДКР (приложении вращающего момента выше момента удержания двигателя) увеличении скорости выше заданной, происходит отпускание тормоза, и блокировка вала двигателя.

Алгоритмы управления стендом испытаний ДКР реализуются в некоммерческой среде программирования *CooCoxCoIDE* на базе *Eclipse*. Библиотека *CMSIS* для ядра *ARM Cortex M3*, и библиотека для работы с периферией *STM32PeripheralLibrary* при использовании встроенного отладчика *ST-Link* позволяют получить различные режимы отладки [7].

Результаты исследований. Для оценки эффективности управления вращающим моментом ДКР варьировались параметры токов обмоток ДКР. В экспериментах использовался восьми обмоточный

ДКР, параметры обмоток которого рассчитаны на напряжение 30 В, ток 3 А. Для получения сопоставимых результатов по измеряемому моменту вращения задавалась частота подачи импульсов питающего напряжения 1 Гц.

На рис. 5 показана осциллограмма тока и напряжения обмотки при питании ДКР униполярными импульсами напряжения. Наличие экспоненциального роста тока вследствие влияния индуктивности обмотки, определяющей динамические параметры импульса переключения, приводит к уменьшению времени протекания номинального значения тока, соответственно его действующего значения. Выбросы токов и напряжений, соответствующие моментам переключения обмоток ДКР, объясняются недостаточными динамическими параметрами источника питания. Такому процессу соответствует измеренный с помощью динамометра максимальный вращающий момент на уровне 205 Н·м.



Рис.5 – Осциллограммы напряжения и тока:

a – изменение тока обмотки во времени;

б – изменение напряжения на обмотке ДКР во времени

В результате улучшения параметров источника питания, получение униполярных импульсов напряжения коммутации позволяют изменить импульсы тока, показанные на рис. 6.

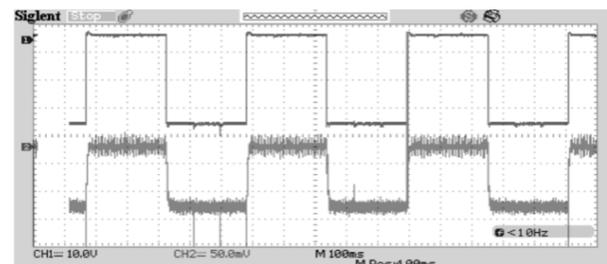


Рис.6 – Осциллограмма токов (нижняя) и напряжений (верхняя) при использовании улучшенных параметров источника питания

Благодаря улучшению динамических параметров импульсов, что выражается в сокращении времени переходных процессов при коммутации обмоток, получено значение максимального вращающего момента на уровне 220 Н·м.

Использование аппаратно-программного комплекса на основе микроконтроллера *STM32* позволяющее генерировать ШИМ-импульсы управления токами обмоток, дает возможность значительно сократить длительность фронтов управляющих импульсов, тем самым улучшить динамику процесса коммутации.

На рис. 7 показана осциллограмма импульсов, в которых благодаря ШИМ минимизированы переходные процессы коммутации.

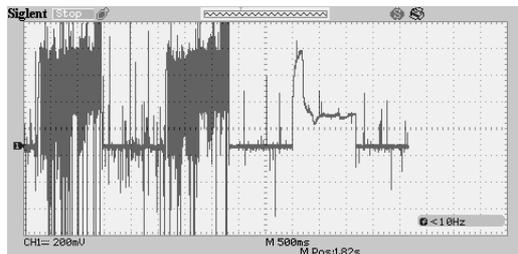


Рис.7 – Формирование импульса тока обмотки ДКР

Это позволило создать условие равенства магнитной индукции в воздушном зазоре ДКР. При этих условиях максимальный вращающий момент достиг значения 240 Н·м.

Использование микропроцессорной системы управления коммутацией токов ДКР при заданных электромагнитных и конструктивных параметрах двигателя позволяет улучшить динамику процесса движения ротора с увеличением максимального вращающего момента двигателя с 205Н·м до 240 Н·м.

Выводы. Проведена оценка системы коммутации токов обмоток ДКР. В качестве аппаратной части использован микроконтроллер STM32F103, позволяющий генерировать сигналы управления по измеренным значениям токов обмоток двигателя. Экспериментально показано, что разработанные алгоритмы управления, основанные на дискретном измерении токов обмоток ДКР, позволяют улучшить динамические показатели двигателя. Полученные результаты дают основания для проведения оптимизации параметров ЗРА и других подобных электроприводов в аспекте энергосбережения и точности позиционирования.

Список литературы: 1. Наний В.В. Аспекты проектирования и испытаний двигателей с катящимся ротором / Наний В.В., Мирошниченко А.Г., Юхимчук В.Д. [и др.] // Вісник НТУ «ХПІ». – 2010. – № 55. – С. 84–88. 2. Борзяк Ю.Г. Электродвигатели с катящимся ротором / Ю.Г. Борзяк, М.А. Зайков, В.П. Наний. – К.: Техніка, 1982. – 120 с. 3. Наний В.В. Магнитные потоки рассеяния в двигателе с катящимся ротором и способ их учета / В.В. Наний, А.М. Масленников, А.А. Дунев // Электрика. – Курск: 2014. – № 2. – С. 29–33. 4. Кихтенко Д.А. Управление шаговыми двигателями в микрошаговом режиме, оптимизация управления / Д.А. Кихтенко // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2003. – № 2. – С. 119–126. 5. Барегамян Г.В. Расчет параметров снаббера транзисторного ключа / Г.В. Барегамян // Изв. НАНРА и ГИУА. Сер. ТН. – 2000. – Т. LIII, № 1. – С. 44–49. 6. Datasheet STM32F103 (Electronic resource) // STM32F103 datasheet and application note, data sheet, circuit, pdf, cross. – 2011. – Mode of access: <http://datasheetarchive.com/STM32F103-datasheet.html>. – Дата обращения : 20 марта 2015. 7. Бродин В. Конфигурация среды Eclipse / GCC для разработки программ STM32 / В. Бродин, С. Чернов // Электронные компоненты. – 2010. – №8. – С. 15–20.

Bibliography (transliterated): 1. Nanij, V.V. Miroshnichenko, A.G., Juhimchuk, V.D. «Aspekty proektirovaniya i ispytaniy dvigatelej s katjashhimsja rotorom». Visnik NTU "HPI". Zbirka naukovih prats. Tematicnij випуск: Problemi udoskonalennya elektrichnih mashin i aparativ. Teoriya i praktika. No. 55. Kharkov: NTU "KPI", 2010. 84–88. Print. 2. Borzjak Ju.G., Zajkov M.A. and Nanij V.P. *Elektrodvigateli s katjashhimsja rotorom*. Kiev: Tehnika, 1982. Print. 3. Nanij, V.V., Maslennikov, A.M. and Dunev A.A. «Magnitnye potoki rassejanija v dvigatele s katjashhimsja rotorom i sposob ih ucheta». Kursk: ElektriKa, 2014. No. 2. 29–33. Print. 4. Kihtenko D.A. «Upravlenie shagovymi dvigateljami v mikroshagovom rezhime, optimizacija upravlenija». Nauchno-tehnicheskij zhurnal. Avtomatika. Avtomatizacija. Elektrotehnicheskie kompleksi i sistemy. Hersonskij nacional'nyj tehniceskij universitet, 2003. No. 2. 119–126. Print. 5. Baregamjan, G.V. «Raschet parametrov snabbera tranzistorного kljucha». Izvestija NAN RA i GIUA. Seriya TN, 2000. No. 1. Vol. LIII. 44–49. Print. 6. Data sheet STM32F103. data sheet and application note, data sheet, circuit, pdf, cross, 2011. Web. 20 March 2015. <http://datasheetarchive.com/STM32F103-datasheet.html>. 7. Brodin V., and S. Chernov. «Konfiguracija sredy Eclipse GCC dlja razrabotki programm STM32». Elektronnye komponenty. No. 8. (2010): 15–20. Print.

Поступила (received) 05.02.2015



Кулинченко Георгий Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Сумской государственной университет, доцент кафедры компьютерных наук; тел.: +38 (095)800-01-23; e-mail: heorhy@yandex.ua

Kulinchenko Heorhii Vasilevich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Sumy State University, associate professor at the Department of computer Sciences, tel.: +38 (095) 800-01-23; e-mail: heorhy@yandex.ua



Масленников Андрей Михайлович – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", доцент кафедры электрических машин; тел. +38 (066) 78-09-783; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua

Masliennikov Andrii Michaylovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Docent at the Department of electrical machines, tel.: (066) 78-09-783; e-mail: x-maslennikov@yandex.ua



Багута Виктор Анатольевич – Шосткинский институт Сумского государственного университета, инженер кафедры системотехники и информационных технологий; тел.: +38(050) 274-70-52; e-mail: viktrbaguta@gmail.com

Baguta Viktor Anatoliyovich – Shostka Institute SDU, Engineer at the Department of Systems Engineering and Information Technology; tel.+38(050)274-70-52; e-mail: viktrbaguta@gmail.com



Дунев Алексей Александрович – кандидат технических наук, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", ассистент кафедры электрических машин; тел. +38(066) 780-97-83; e-mail: lex_from_kharkov@mail.ru.

Duniev Oleksii Oleksandrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department of electrical machines; tel. +3(096) 909-11-04; e-mail: lex_from_kharkov@mail.ru