

Использование буферного источника электроэнергии на базе суперконденсатора для пуска асинхронного электропривода под нагрузкой

¹*САЙФУЛИН Руслан Фаритович, докторант, преподаватель, azoorjke@gmail.com,

¹КАЛИНИН Алексей Анатольевич, PhD, доцент, зав. кафедрой, a.kalinin@kstu.kz,

¹БРЕЙДО Иосиф Вульфович, д.т.н., профессор, jbreido@mail.ru,

¹КОТОВ Евгений Сергеевич, старший преподаватель, kotov1988@mail.ru,

¹Карагандинский технический университет, Казахстан, 100027, Караганда, пр. Назарбаева 56,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Работа посвящена созданию модели асинхронного привода во вращающейся системе координат с буферным источником электропитания на базе суперконденсатора. Данная система координат осуществляет переход из трехфазной системы в двухфазную. Предложены новые математические замены для упрощения решения уравнений. Предложены новые методы создания модели в Matlab Simulink. Доказана адекватность и правильность созданной модели. Проведен анализ динамических процессов, протекающих в электроприводе при подключении суперконденсаторов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, математическая модель, Matlab Simulink, дифференциальные уравнения, суперконденсатор.

Введение

Энергетические установки с электрическим приводом, системы мониторинга и диагностики в странах Центральной, Средней Азии, а также Австралии часто находятся в районах, удаленных от промышленных электрических сетей. Для таких условий характерны случаи, когда мощность источника электрической энергии становится соизмерима с мощностью электропривода из-за потерь в протяженной сети линий электропередачи [1]. Протяженность длинной линии превышает допустимую, в результате чего происходит снижение количества напряжения, приходящего на промышленное предприятие, находящееся удаленно. Отсюда появляется необходимость в использовании либо дополнительных автономных источников электроэнергии, которые будут создавать комбинированную систему питания электропривода, либо в реализации различных методов и способов пуска электропривода. К таким методам и способам можно отнести электроснабжение от дизельной, газотурбинной электростанции, от автономного трансформатора, реакторный пуск электропривода, использование синхронного генератора, бесперебойные источники питания. Однако, несмотря на такой широкий выбор перечисленных методов и способов пуска электропривода в удаленных районах, каждый из них несет за собой ряд недостатков. Большинство из данных недостатков были рассмотрены в пре-

дыдущей работе, сейчас же предлагается рассмотреть недостатки использования аккумуляторных батарей в качестве автономных источников.

Во многих отраслях промышленности, в частности в горной, металлургической, топливной, для пуска электродвигателей под нагрузкой требуются источники питания высокой надежности. Источники бесперебойного питания (ИБП) используются для улучшения качества электроэнергии и гарантии надежности резервного питания. Во время провалов напряжения или полного прерывания электроснабжения энергия должна подаваться локальными системами хранения энергии. Система хранения электроэнергии на основе ИБП в основном полагается на выбор хорошей свинцово-кислотной батареи-аккумуляторов. Однако у аккумуляторов есть много недостатков, таких как низкая удельная мощность и ограниченные циклы заряда/разряда. Более того, получение импульсной мощности вместо средней мощности от батареи может сократить срок ее службы. Также колебания тока вызывают переходные процессы напряжения, импульсные токи имеют более высокое среднеквадратичное значение, которое может привести к увеличению потерь батареи, пульсирующие токи также уменьшают значительно время работы от батареи. В связи с чем предлагается заменить выбор аккумуляторов на базе свинцово-кислотной батареи на блоки суперконденсаторов.

Использование суперконденсаторов в качестве буферных источников энергии рассмотрено во многих работах, однако, в них есть ряд вопросов, который не был учтен [2,3]. В частности, во всех случаях оцениваются лишь статические характеристики электропривода, не рассматривается работа двигателя в динамике. Также основной упор в данных работах делается на режим работы – рекуперация, не затрагивая пуск двигателя при просадке сети и не оценивая двигатель в динамике. Модели двигателей берутся из стандартной библиотеки Matlab Simulink, где используются упрощенные модели, построенные лишь по основным техническим параметрам, не позволяющим точно проследить динамику переходных процессов, происходящих внутри данных моделей. Помимо этого встречаются случаи, когда блок суперконденсаторов подключается по системе Г-Д, без использования частотного преобразователя, что уменьшает его эффективность [4,5].

В других работах большой упор сделан на рассмотрение переходных процессов, протекающих в суперконденсаторах, на режимах их заряда и разряда, но при этом нет анализов влияния блоков суперконденсатора на динамику асинхронного двигателя [6]. В связи с чем было решено рассмотреть динамику работы электропривода при пусковых режимах и питании от комбинированной буферной системы на базе блоков суперконденсаторов.

Математический расчет модели асинхронного привода

Объектами исследования данной статьи являются система питания частотно-регулируемого асинхронного двигателя и система буферного источника электроснабжения на базе суперконденсаторов. Анализ их соединения проводится на основе механических характеристик при запуске двигателя под нагрузкой. Полученные графики скорости и момента представляют собой опорный сигнал системы управления приводом для регулирования скорости двигателя и, следовательно, его питания. После того как скорость, относительное положение в пространстве и нагрузка были определены, система буферного источника электроэнергии была выбрана и рассчитана. Эта система состоит из нескольких банков суперконденсаторов, которые подключаются к звену постоянного тока преобразователя частоты. В данной статье имитационная модель буферного источника электроснабжения на базе суперконденсаторов была усовершенствована, по

сравнению с предыдущими версиями модели, с добавлением возможности подзарядки блоков суперконденсатора посредством их соединения через двунаправленный DC-DC преобразователь [7].

Блок суперконденсаторов обеспечивает пиковую мощность электродвигателя во время его пуска при просадке питающей сети. Суперконденсатор восстанавливает (перезаряжается) энергию во время пуска без просадки напряжения сети.

Двунаправленный DC-DC преобразователь постоянного тока в постоянный – это метод подключения между запоминающим устройством, являющимся частью системы управления буферного источника энергии, и каналом постоянного тока, он должен быть двунаправленным, чтобы ток мог течь в обоих направлениях, в соответствии с циклом разряда или перезарядки блока суперконденсаторов.

В данной работе рассматривается схема асинхронного электродвигателя АИР160S4 со следующими параметрами, представленными в таблице.

Система уравнений для описания асинхронной машины переменного тока, основывается на четырех законах – второй закон Кирхгофа, закон Ампера, второй закон Ньютона и правило левой руки Ленца и указана в формуле (1).

$$\begin{cases} \vec{U}_s = r_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} + j\alpha_k \vec{\Psi}_s, \\ \vec{U}_R = r_R \vec{i}_R + \frac{d\vec{\Psi}_R}{dt} + j(\alpha_k - p\vartheta_m) \vec{\Psi}_R, \\ \vec{\Psi}_s = x_s \vec{i}_s + x_m \vec{i}_R, \\ \vec{\Psi}_R = x_R \vec{i}_R + x_m \vec{i}_s, \\ m = kMod(\vec{\Psi}_i x_i), \\ \vec{T}_m \frac{d\vartheta}{dt} = m - m_c. \end{cases} \quad (1)$$

На основе системы уравнений (1) была посчитана и разработана модель асинхронного двигателя, данная модель показана на рисунке 1.

Алгоритм работы системы управления буферным источником электроэнергии

Для того чтобы блок суперконденсаторов был не всегда подключен к звену постоянного тока преобразователя частоты, т.е. его запас электроэнергии не тратился впустую, а также имелась возможность автоматической подзарядки данного блока, был разработан алгоритм системы управления буферным источником электроэнергии на базе суперконденсаторов, описанный ниже.

Если напряжение с выпрямителя меньше номинального, заданного заранее системе управле-

Параметры АИР160S4									
Электро-двигатель	Мощность	Скорость	Напряжение	КПД	Коэф. мощн.	Ip/In	Mп/Мн	Mmax/Мн	Момент инерции
АИР160S4	15 кВт	1450 об/мин	400 В	89,5%	0,86	7,7	2,2	2,6	0,075 кг*м ²

ния, то замыкается ключ, подключающий систему буферного источника электроснабжения на базе суперконденсаторов (рисунок 2, красный сигнал). В результате чего выпрямленное напряжение питания последовательно соединяется с блоком суперконденсаторов. Выпрямленное напряжение через двунаправленный DC-DC преобразователь последовательно суммируется с напряжением, выдаваемым блоком суперконденсаторов. Суммарное выпрямленное напряжение в дальнейшем идет на систему инверторов для дальнейшего преобразования.

В ином случае, если при сравнении напряжения выпрямителя с номинальным, просадок сети не имеется (напряжение с выпрямителя больше или равно номинальному), система ключей под-

соединяет блок суперконденсаторов на зарядку (рисунок 3, красный сигнал), то есть блок суперконденсаторов включается в цепь питающего напряжения параллельно. При достижении заряда блока суперконденсатора SOC в 100% зарядка останавливается.

Имитационное моделирование

При просадке напряжения до 20% система управления буферным источником электроэнергии включает блок суперконденсаторов последовательно в звено постоянного тока преобразователя частоты, тем самым получая дополнительную – буферную энергию, равную заряду данного блока. Переходные процессы, происходящие в блоке суперконденсаторов в этом случае, показаны на

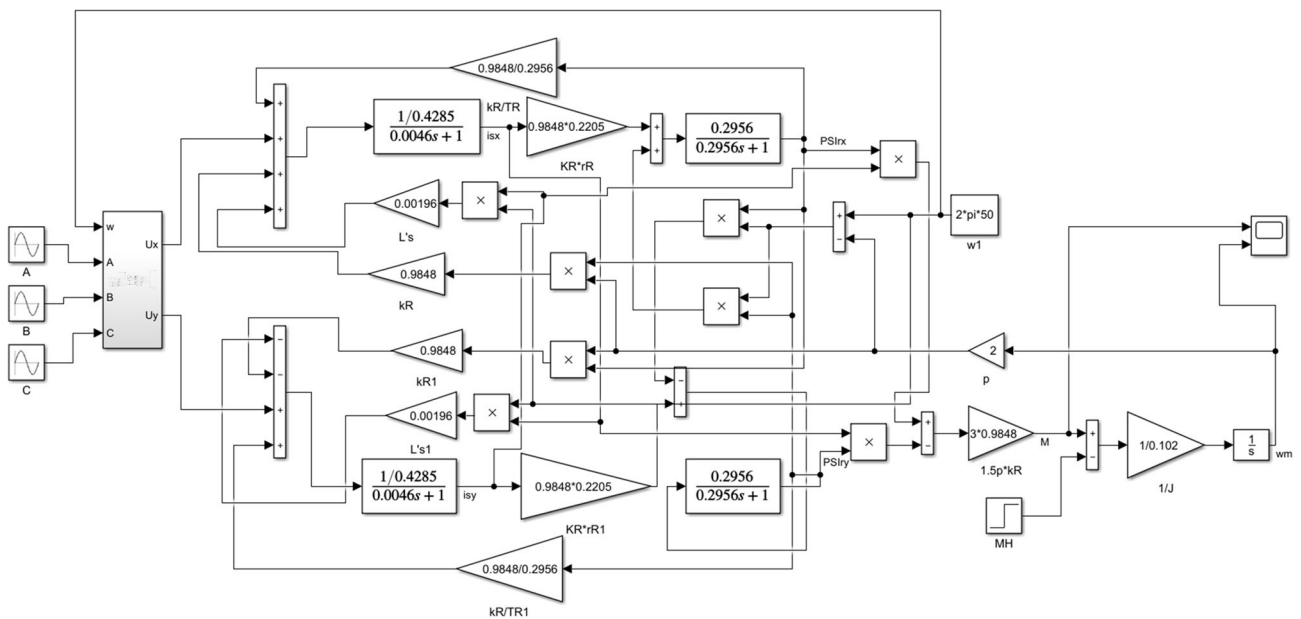


Рисунок 1 – Модель, собранная в Simulink

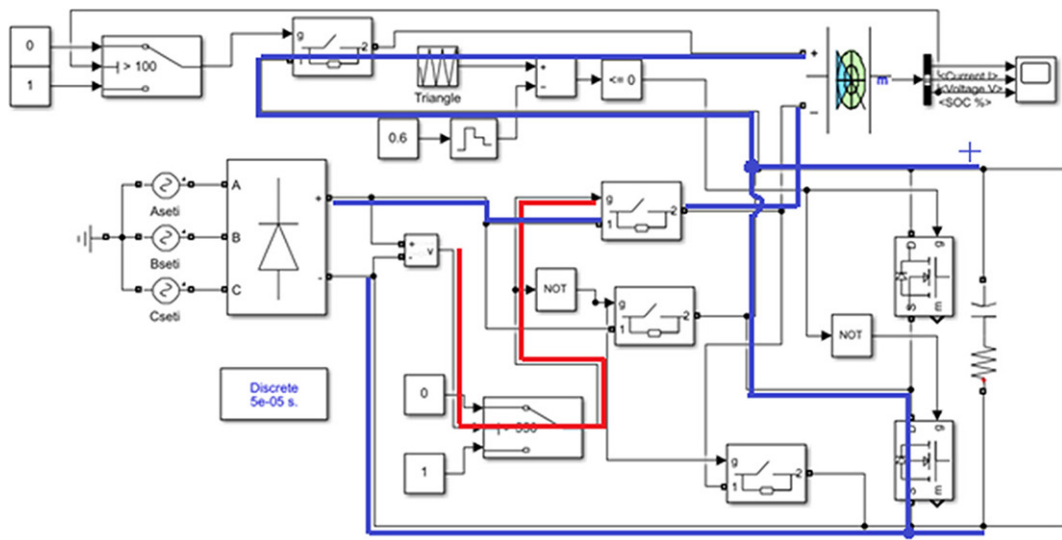


Рисунок 2 – Разряд суперконденсатора

рисунках 4, 5.

Выбранный блок суперконденсаторов начинает выдавать напряжение, составляющее 110 В, которое позволяет компенсировать потери в сети. Заряженного на 100% блока суперконденсаторов хватит примерно на 50 секунд буферного энергоснабжения сети до полной разрядки судя по моделированию.

Анализируя рабочие характеристики асинхронного двигателя во время зарядки блока суперконденсаторов, можно сделать выводы о том, что время до установившейся работы двигателя увеличилось на 0,05 секунд, что составляет 16,6% и является удовлетворительным для пуска двигателя под нагрузкой. Перерегулирование во время зарядки блока суперконденсаторов увеличилось с

14,2% до 25%, что также незначительно сказывается на качестве переходного процесса. При этом электрические характеристики двигателя – потокосцепление ротора, ток статора при зарядке почти никак не изменились. В результате чего можно сделать выводы о том, что блок суперконденсаторов можно использовать в качестве буферного источника электроэнергии при просадках сети до 20%.

Выводы

При электроснабжении электроприводов конвейерных линий металлургического, горного производств, находящихся в районах, удаленных от промышленных сетей, возникают проблемы с пуском данного электропривода из-за потерь на

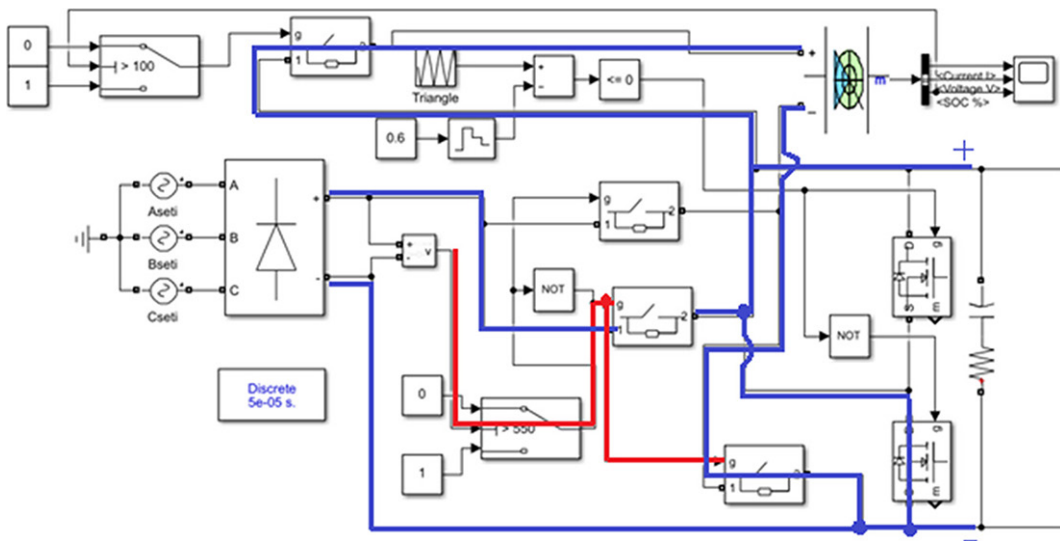


Рисунок 3 – Заряд суперконденсатора

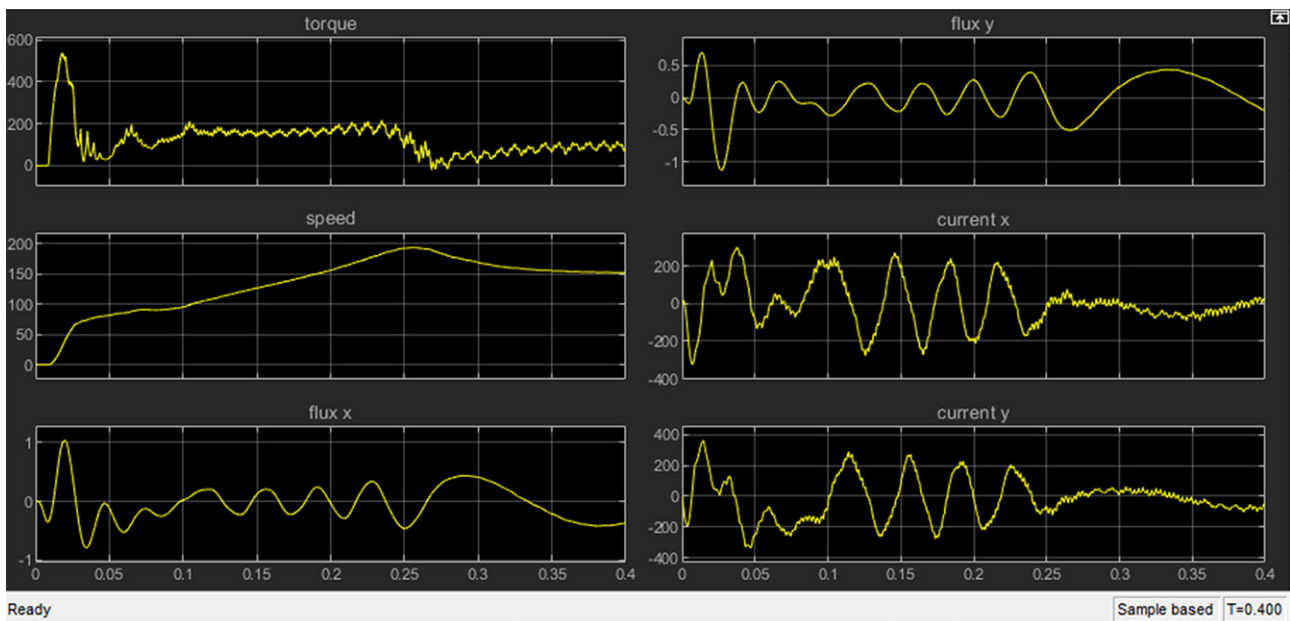


Рисунок 4 – Выходные характеристики при использовании суперконденсатора в качестве буферного источника электроэнергии

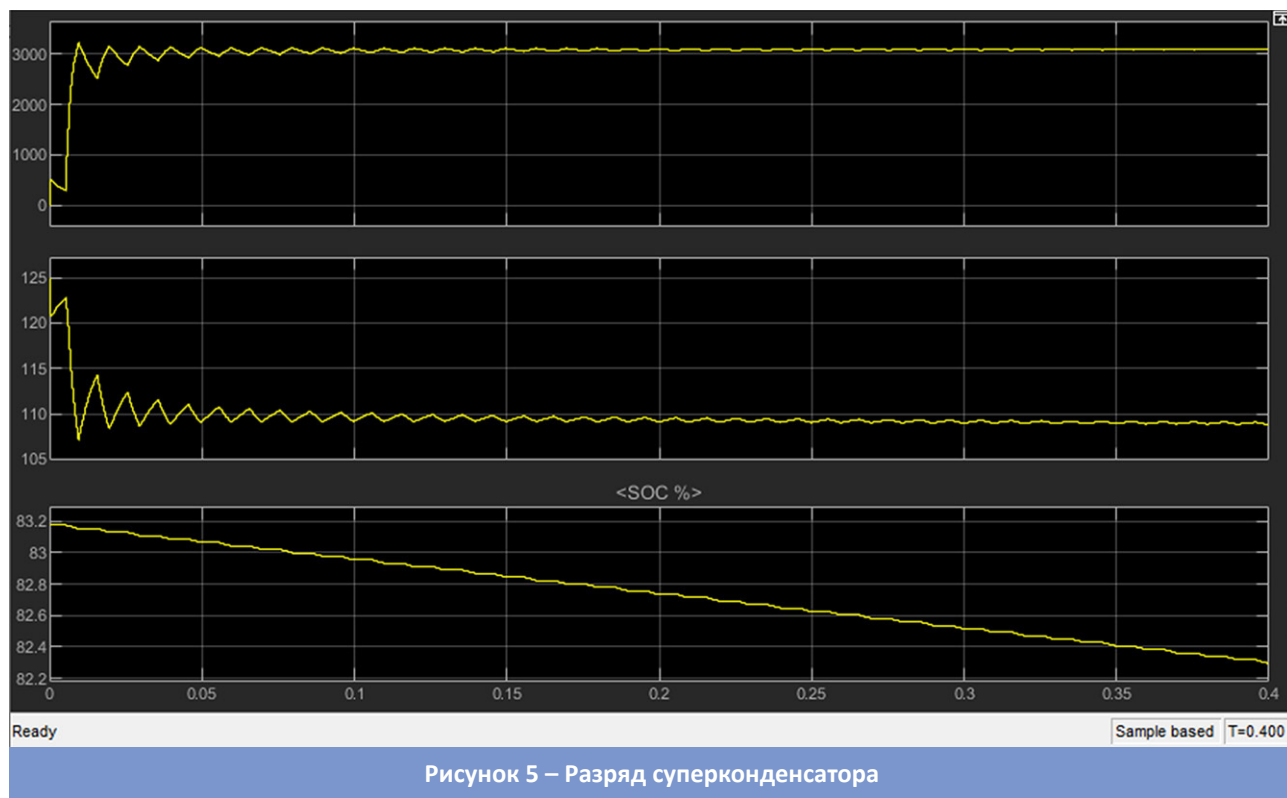


Рисунок 5 – Разряд суперконденсатора

длинной линии. Питающее напряжение может быть на 20% меньше номинального значения, в результате чего пусковой момент значительно падает и электродвигатель не способен запуститься под нагрузкой. В результате чего рекомендуется использовать дополнительный буферный источник электроэнергии, разработанный на базе блока суперконденсаторов.

В статье описана математическая модель электродвигателя, источника электроэнергии, разработаны имитационные модели преобразователя частоты, буферного источника электроэнергии. Доказано что использование блока суперконденсаторов позволяет компенсировать потери в сети и осуществлять пуск электродвигателя под нагрузкой.

Предложен алгоритм работы системы управления буферным источником электроэнергии. Результаты могут быть применены для электро-

питания оборудования, содержащего ЭДС и активно-индуктивную нагрузку, в том числе для электроприводов, аккумуляторов, автономных источников в устройствах автоматики.

Анализ моделирования показал правильность выдвинутого предположения об использовании буферного источника электроэнергии и подтвердил возможность использования блока суперконденсаторов. В итоге на конвейерных линиях горного производства и металлургии, где используется данный двигатель, можно использовать разработанную систему буферного источника электроэнергии как резервную систему электроснабжения при пуске электропривода.

Направление дальнейших исследований будет заключаться в попытке использовать энергию, вырабатываемую во время рекуперации для зарядки буферного источника энергии на базе суперконденсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Breido I.; Kaverin V. & Em G. (2018) The research of the adjustable electric drive of the direct current DAAAM International Scientific Book 2018 Vol. 17, pp. 211-226, ISSN 1726-9687.
2. Belodedov, A. Model design of a controlled DC drive with a supercapacitor unit [Electronic resource] / A. Belodedov, O. Lysenko // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: conference proceeding, 15-17 November 2016 / Omsk State Technical University. – Omsk, 2016. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818978.
3. Stana, Girts & Brazis, Viesturs & Apse-Apsitis, Peteris. (2015). Simulation of Induction Traction Drive with Supercapacitor Energy Storage System Test Bench. Electrical, Control and Communication Engineering. 9. 10.1515/ecce-2015-0007.
4. Ndokaj, Artan & Napoli, A. & Pedde, Giovanni & Pasquali, Manlio. (2013). Regulation strategy of an Ultracapacitor storage model for a gantry crane. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). 1209-1216. 10.1109/IECON.2013.6699305.
5. Kumar, M.K. & Datta, D.V. & Muni, Vijay. (2019). Performance enhancement of asynchronous machine with super capacitor. International Journal of Engineering and Advanced Technology. 8. 1208-1210.

6. A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi and A. Troudi. "Battery/Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS)", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1509-1522, April 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210736.
7. Breido Iosiff, Saifulin Ruslan. "Analysis of starting modes in frequency controlled asynchronous electric drive for mining production using buffer power supplies". Annals of DAAAM & Proceedings, 2020, p. 0118, DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.016 EID: 2-s2.0-85098124600 Part of ISBN: 17269679.

Жүктеме кезінде асинхронды электр жетегін іске қосу үшін суперконденсаторға негізделген буферлік қуат көзін пайдалану

¹*САЙФУЛИН Руслан Фаритович, докторант, оқытушы, azoorjke@gmail.com,

¹КАЛИНИН Алексей Анатольевич, PhD, доцент, кафедра меңгерушісі, a.kalinin@kstu.kz,

¹БРЕЙДО Иосиф Вульфович, т.ғ.д., профессор, jbreido@mail.ru,

¹КОТОВ Евгений Сергеевич, аға оқытушы, kotov1988@mail.ru,

¹Қарағанды техникалық университеті, Қазақстан, 100027, Қарағанды, Н. Назарбаев даңғылы, 56,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Жұмыс суперконденсаторға негізделген буферлік қуат көзі бар айналмалы координаттар жүйесінде асинхронды жетектің моделін құруға арналған. Бұл координат жүйесі үшфазалы жүйеден екіфазалыға ауысады. Теңдеулерді шешуді жеңілдету үшін жаңа математикалық алмастырулар ұсынылады. Matlab Simulink-те модель құрудың жаңа әдістері ұсынылған. Жасалған модельдің сәйкестігі мен дұрыстығы дәлелденді. Суперконденсаторларды қосу кезінде электр жетегінде болатын динамикалық процестерге талдау жүргізілді.

Кілт сөздер: асинхронды қозғалтқыш, математикалық модель, Matlab Simulink, дифференциалдық теңдеулер, суперконденсатор.

Use of a Buffer Power Source Based on a Supercapacitor for Starting an Asynchronous Electric Drive under Load

¹*SAIFULIN Ruslan, doctoral student, Lecturer, azoorjke@gmail.com,

¹KALININ Alexey, PhD, Associate Professor, Head of Department, a.kalinin@kstu.kz,

¹BREIDO Iosif, Dr. Tech. Sci., Professor, jbreido@mail.ru,

¹KOTOV Evgenyi, Senior Lecturer, kotov1988@mail.ru,

¹Karaganda Technical University, Kazakhstan, 100027, Karaganda, N. Nazarbayev Avenue, 56,

*corresponding author.

Abstract. The work is devoted to the creation of a model of an asynchronous drive in a rotating coordinate system with a buffer power supply based on a supercapacitor. This coordinate system makes the transition from a three-phase system to a two-phase one. New mathematical replacements are proposed to simplify the solution of equations. New methods of creating a model in Matlab Simulink are proposed. The adequacy and correctness of the created model has been proven. The analysis of the dynamic processes occurring in the electric drive when connecting supercapacitors is carried out.

Keywords: asynchronous motor, mathematical model, Matlab Simulink, differential equations, supercapacitor.

REFERENCES

1. Breido I.; Kaverin V. & Em G. (2018) The research of the adjustable electric drive of the direct current DAAAM International Scientific Book 2018 Vol. 17, pp. 211-226, ISSN 1726-9687.
2. Belodedov, A. Model design of a controlled DC drive with a supercapacitor unit [Electronic resource] / A. Belodedov, O. Lysenko // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines: conference proceeding, 15-17 November 2016 / Omsk State Technical University. – Omsk, 2016. – DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818978.
3. Stana, Girts & Brazis, Viesturs & Apse-Apsitis, Peteris. (2015). Simulation of Induction Traction Drive with Supercapacitor Energy Storage System Test Bench. Electrical, Control and Communication Engineering. 9. 10.1515/ecce-2015-0007.
4. Ndokaj, Artan & Napoli, A. & Pede, Giovanni & Pasquali, Manlio. (2013). Regulation strategy of an Ultracapacitor storage model for a gantry crane. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference). 1209-1216. 10.1109/IECON.2013.6699305.
5. Kumar, M.K. & Datta, D.V. & Muni, Vijay. (2019). Performance enhancement of asynchronous machine with super capacitor. International Journal of Engineering and Advanced Technology. 8. 1208-1210.
6. A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi and A. Troudi. "Battery/Supercapacitors Combination in Uninterruptible Power Supply (UPS)", in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 4, pp. 1509-1522, April 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2210736.
7. Breido Iosiff, Saifulin Ruslan. "Analysis of starting modes in frequency controlled asynchronous electric drive for mining production using buffer power supplies". Annals of DAAAM & Proceedings, 2020, p. 0118, DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.016 EID: 2-s2.0-85098124600 Part of ISBN: 17269679.