

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 4 (2020)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и
теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов Т. А.,	<i>к.т.н., доцент (Россия)</i>
Оспанова Н. Н.,	<i>к.п.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD, доцент</i>
Шокубаева З. Ж.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

Р. Ф. Сайфулин, И. В. Брейдо

Карагандинский технический университет, Республика Казахстан,
г. Караганда

АНАЛИЗ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Эксплуатация асинхронного электропривода горного производства в регионах Средней и Центральной Азии осложняется тем, что данные объекты находятся в районах удаленных от промышленных сетей. Из-за этого длина линий электропередачи может превышать допустимую и происходит существенное падение напряжения в сети.

В работе разработана модель трехфазного частотно-регулируемого асинхронного электропривода в Simulink Matlab 2019 преобразованная в двухфазную модель. Предложено падение напряжения в сети в пусковых режимах под нагрузкой компенсировать с использованием суперконденсаторов в качестве буферного источника питания, подключенного на выход звена постоянного тока в преобразователе частоты. Выполнено имитационное моделирование при различном питающем напряжении и различных способах подключения блока суперконденсаторов.

Получено, что такой принцип реализации дополнительного источника электрической энергии позволяет осуществлять пуски асинхронных электроприводов в районах, удаленных от промышленных сетей без значимого влияния на их статические и динамические характеристики.

Ключевые слова: Электродвигатель; моделирование; Matlab Simulink; суперконденсатор; качество переходного процесса.

Введение

Исследование работы частотно-регулируемого асинхронного электропривода является весьма актуальной задачей. Как известно, энергетические установки с электрическим приводом 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 из-за чего происходит падение напряжения в промышленных предприятиях. Поэтому появляется необходимость в использовании дополнительных автономных источников электроэнергии, создающих комбинированную систему питания электропривода, либо в использовании различных методов пуска электропривода. К таким способам можно отнести питание от дизельной, газотурбинной электростанции, от автономного трансформатора, реакторный пуск электропривода, использование синхронного генератора. Однако, несмотря на такой широкий выбор методов пуска электропривода в удаленных районах каждый из данных методов несет за собой ряд недостатков.

Материалы и методы

в качестве примера, в работах Anamika Dewangan, Virendra Sharm «SVPWM techniques used for controlling Three-Phase Induction Motor energized by renewable energy source» [2], Ю. В. Шевырёва, Д. А. Моргачёва «Исследование электромагнитной совместимости частотно-регулируемого электропривода буровой установки и источника электроэнергии соизмеримой мощности» [3] используются альтернативные источники энергии, а также дизель-генераторные установки в качестве буферных, однако, данный тип снабжения электрической энергии не является эффективным, как в случае с солнечными батареями, а также экологически полезным и удобным, как в случае дизель-генератора.

Помимо этого предлагается улучшение непосредственно сетей передачи электроэнергии путем использования фильтрокомпенсирующих устройств – Шевырёв Ю. В. «Обоснование и повышение энергетических показателей регулируемых электроприводов буровых установок» [4], но данный способ также не является рациональным из-за сложности реализации идеи, заключающейся в изменении строения существующих систем линий электропередач.

Поэтому для решения данной проблемы предлагается использовать так называемые суперконденсаторы в качестве автономного буферного источника электрической энергии.

Результаты и обсуждение

Суперконденсатор (ионистор, ультраконденсатор) – электрохимическое устройство, которое может запасать значительное количество энергии. Состоит из двух пластин – положительно и отрицательно заряженных, которые помещены в электролит. Во время зарядки суперконденсатора ионы из электролита накапливаются на стенках данного устройства. Ключевое отличие суперконденсатора от аккумулятора это отсутствие химических

реакций, что позволяет им заряжаться и разряжаться в разы быстрее, а также они не подвержены химическому износу, что позволяет использовать их в сотнях тысяч циклов зарядки и разрядки. Данные свойства отлично подходят для электропривода. Наибольшая нагрузка на сеть происходит во время пуска электродвигателя, как раз в этот момент и происходит ее просадка и появляется необходимость в буферном источнике электроэнергии, способном мгновенно выдать определенный объем электрической энергии.

Использование суперконденсаторов в качестве буферных источников энергии рассмотрено в работах Белодедова А. Е., Лысенко О. А. «Создание модели регулируемого привода постоянного тока с блоком суперконденсаторов» [5], Girts Stana, Viesturs Brazis, Peteris Apse-Apsitis «Simulation of Induction Traction Drive with supercapacitor energy storage system test bench» [6], Artan Ndokaj, A. Di Napoli, Giovanni Pede, Manlio Pasquali «Regulation strategy of an Ultracapacitor storage model for a gantry crane» [7], однако, и в данных работах есть ряд вопросов, который не был рассмотрен. 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, которая разработаны с большими допущениями и не совпадают с реальными аналогами, используемыми в промышленности. Помимо этого в работе Malligunta Kiran Kumar, Dhanekula Vallisa Datta, T Vijay Muni «Performance enhancement of Asynchronous Machine with Super Capacitor» [8] блок суперконденсаторов подключается по системе Г-Д, без использования частотного преобразователя, что уменьшает его эффективность.

Таким образом, исследование пусковых режимов работы асинхронного электродвигателя с частотным управлением при дополнительных электропитании от буферных источников является актуальной научно-технической задачей.

Применение суперконденсаторов в звене постоянного тока преобразователя частоты в качестве буферного источника электроэнергии, а также ее накопление в режиме рекуперативного торможения позволит решить вопросы питания энергетических установок в районах удаленных от промышленных сетей, а также позволит экономить электрическую энергию запасая ее во время рекуперации.

В работе применяются метод моделирования асинхронного электропривода на базе пакета программ Matlab Simulink, а также его математическое описание с использованием основных законов физики и операторов Лапласа, также приведен анализ полученных результатов.

В процессе разработки модели был использован способ прямого включения суперконденсатора в звено постоянного тока преобразователя частоты. В дальнейшем планируется использование схема двунаправленного DC-DC преобразователя для полного использования энергии суперконденсатора. Схема подключения представлена на рисунке 1.

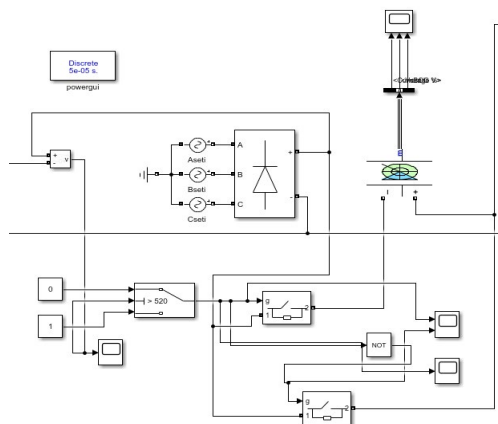


Рисунок 1 – Схема подключения суперконденсатора

На рисунке 1 также изображена схема управления блоком суперконденсатора. Измеряется выпрямленное значение напряжения промышленной сети и сравнивается с заранее заданным. Если в результате сравнения выпрямленное напряжение оказывается больше или равно заданному, то система ключей замыкается напрямую на подсистему инверторов, минуя блок суперконденсатора, а если же значение выпрямленного напряжения промышленной сети оказывается недостаточно, то система ключей подключает блок суперконденсаторов, соединенных последовательно со звеном постоянного тока преобразователя частоты, в результате чего появляется буферный источник электрической энергии.

В данной работе рассматривается схема асинхронного электродвигателя АИР160S4 со следующими параметрами, представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Гараметры АИР160S4

Р	ω , об/мин	U, В	η , %	Коэф. мощн.	Ип/In	Мп/Мн	Мmax/Мн	J, кгм ²
15 кВт	1450	400	89,5	0,86	7,7	2,2	2,6	0,075

Преобразователь частоты состоит из блоков диодного моста, суперконденсатора и системы ключей, изображенных на рисунке 1, а также подсистемы инверторов, реализованных на базе MOSFET-транзисторов и их управляющих сигналов АН, ВН, СН, АЛ, ВЛ, СЛ реализованных через ШИМ-генератор, показанных на рисунках 2 и 3.

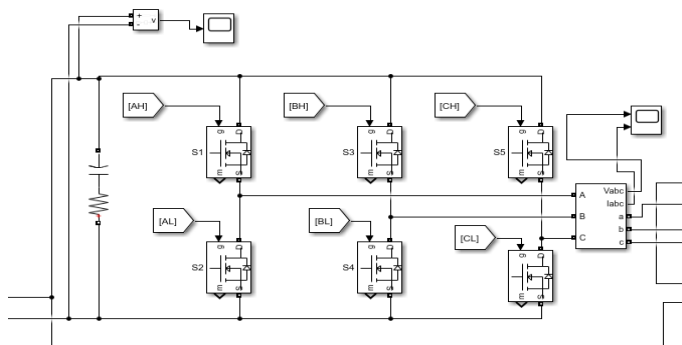


Рисунок 2 – Подсистема инверторов на базе MOSFET-транзисторов

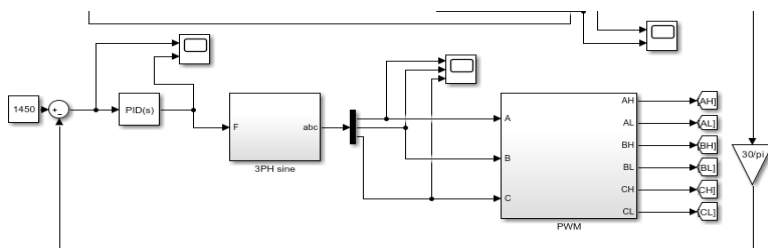


Рисунок 3 – ШИМ-генератор управляющих сигналов для транзисторов

В общем случае на обмотку статора подается трехфазная система напряжений, смещенная на 120 градусов друг относительно друга. А суммарный вектор напряжения будет равен сумме векторов напряжений каждой из фаз, формула (1).

$$\vec{U}_\Sigma = U_m \sin \omega t + U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (1)$$

Проекция вектора на фазные оси определяют мгновенные напряжения на каждой из фаз А, В, С. Подобным же образом можно описать все уравнения тока и потокосцепления, которые описывают работу асинхронного двигателя переменного тока.

Однако, при разработке реальных систем электродвигателя переменного тока часто используют преобразователи фаз 3/2. Преобразователь 3/2 из трехфазной системы напряжения А, В, С создают двухфазную α, β . Переход к новой двухфазной системе позволяет рассматривать пространственный вектор напряжения в прямоугольной системе координат. Такая замена переменных используется при математическом описании электрических машин, а в частности для упрощения решения и записи дифференциальных уравнений статора и ротора.

После получения частотно-преобразованного питающего сигнала с выхода частотного регулятора напряжение преобразуется из трехфазного синусоидального в двухфазное для создания модели асинхронного двигателя во вращающейся системе координат – рисунок 4. В Результате чего фазное напряжение U_a, U_b, U_c преобразуется в U_x, U_y .

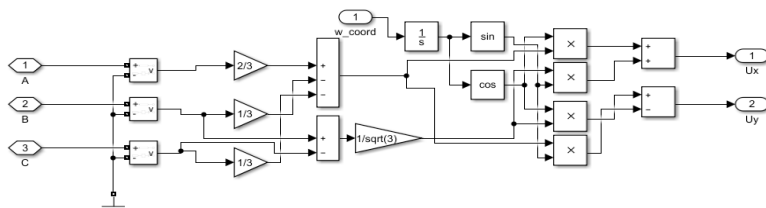


Рисунок 4 – Преобразование питающего напряжения

Полученное двухфазное напряжение используется для питания модели асинхронного двигателя во вращающейся системе координат.

На основе системы уравнений в формуле 2 была посчитана и разработана модель асинхронного двигателя, данная модель показана на рисунке 5.

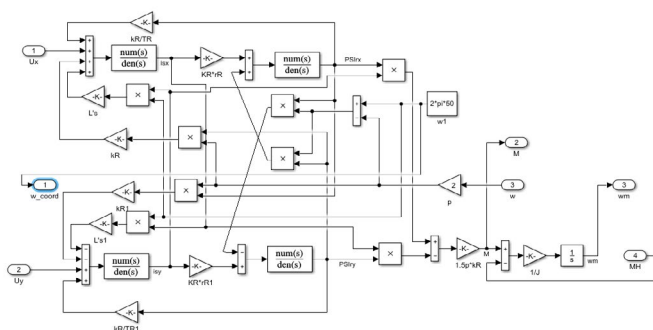


Рисунок 5 – Модель асинхронного двигателя

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{U}_{Sx} = r \vec{i}_{Sx} + \frac{x'_{sx} d \vec{i}_{Sx}}{dt} - \alpha_k x'_s \vec{i}_{Sy} - \frac{k_R}{T_R} \vec{\Psi}_{Rx} - p \vartheta_m k_R \vec{\Psi}_{Ry} \\ \vec{U}_{Sy} = r \vec{i}_{Sy} + \frac{x'_{sx} d \vec{i}_{Sy}}{dt} - \alpha_k x'_s \vec{i}_{Sx} - \frac{k_R}{T_R} \vec{\Psi}_{Ry} + p \vartheta_m k_R \vec{\Psi}_{Rx} \\ \vec{U}_{Rx} = 0 = \frac{1}{T_R} \vec{\Psi}_{Rx} + \frac{d \vec{\Psi}_{Rx}}{dt} - k_R r_R \vec{i}_{Sx} - (\alpha_k - p \vartheta_m) \vec{\Psi}_{Ry} \\ \vec{U}_{Ry} = 0 = \frac{1}{T_R} \vec{\Psi}_{Ry} + \frac{d \vec{\Psi}_{Ry}}{dt} - k_R r_R \vec{i}_{Sy} + (\alpha_k - p \vartheta_m) \vec{\Psi}_{Rx} \\ m = k_R (\vec{\Psi}_{Rx} \vec{i}_{Sy} - \vec{\Psi}_{Ry} \vec{i}_{Sx}) \\ T_m \frac{d \vartheta_m}{dt} = m - m_c \end{array} \right. \quad (2)$$

После того как модель всей системы была создана, начались виртуальные эксперименты с комбинированным источником питания.

Эксперимент №1 – номинальное питание сети – 400 В, двигатель запущен под нагрузкой в момент времени 0,055 сек. Так как напряжение номинальное, блок суперконденсаторов в этот момент отключен от питающей системы. Графики момента, скорости, потокоцепления и тока статора представлены на рисунке 6.

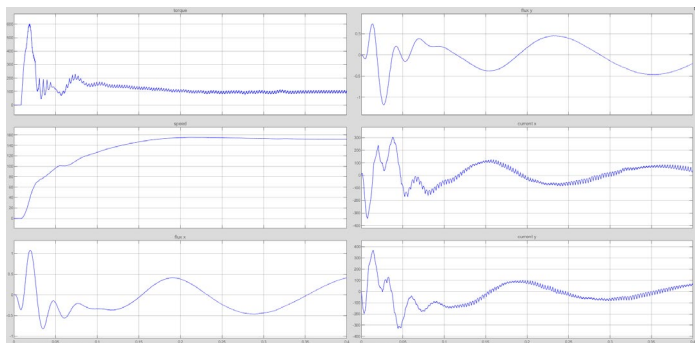


Рисунок 6 – Характеристики при 400 В

Как видно из графиков двигатель развивает номинальный момент в 97.5 Н, а также номинальную скорость в 152 рад/с. При этом в момент времени 0,055 сек. наблюдается просадка по моменту из-за подключения нагрузки. Процесс монотонный, перерегулирование составляет 1,97 %, время переходного процесса составляет 0,2 сек.

Эксперимент № 2 – предполагается просадка сети в размере 20 %, что составит 320 В питающего напряжения, блок суперконденсаторов в данном эксперименте отключен. Графики момента, скорости, потокосцепления и тока статора представлены на рисунке 7.

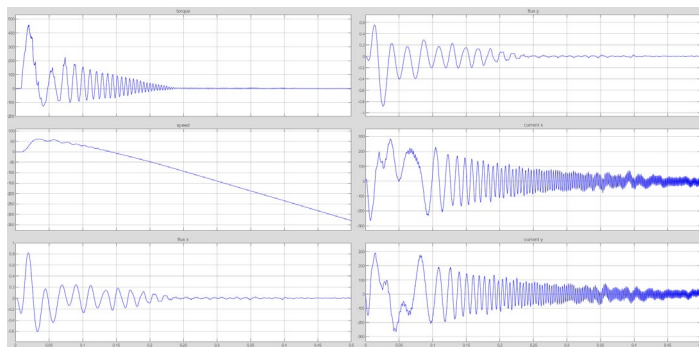


Рисунок 7 – Характеристики при 320 В

При данном напряжении питающей сети двигатель при подключении нагрузки не может преодолеть момент сил сопротивления и «опрокидывается». Система становится неустойчивой.

Эксперимент № 3 – также предполагается просадка сети в размере 20 %, питающее напряжение соответственно равно 320 В, но при этом путем задействована комбинированная система питания электродвигателя. Будет использовано дополнительное напряжение блока суперконденсаторов. Графики представлены на рисунке 8.

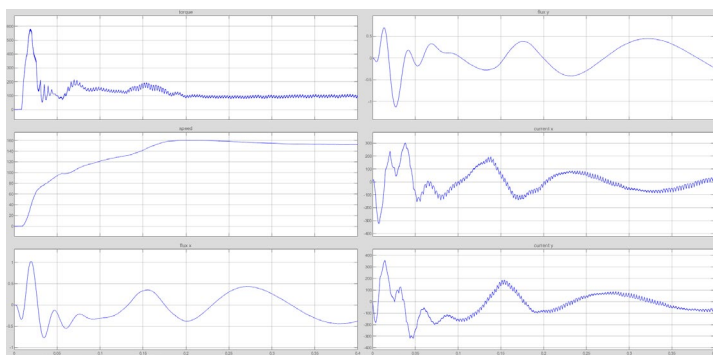


Рисунок 8 – Характеристики при 320 В и блоке суперконденсаторов

На данных графиках видно что благодаря блоку суперконденсаторов, выступающих в роли буферных источников энергии, двигателю в момент подключения нагрузки при 0,055 сек. удастся достичь номинальных значений. При этом увеличилось время переходного процесса на 0,1 сек. и перерегулирование до 5,26 %. Однако, данные значения являются допустимыми при оценке качества переходного процесса. Из монотонного переходной процесс превратился в апериодический. Однако именно использование блока суперконденсаторов в качестве дополнительного источника электрической энергии позволило осуществить пуск асинхронного двигателя при просадке питающей сети в 20 %.

На рисунке 9 показаны выпрямленное напряжение сети и комбинированное напряжение сети и блока суперконденсаторов на выходе из звена постоянного тока частотного преобразователя. На графиках можно наблюдать незначительное влияние блока суперконденсаторов на выходное напряжение со звена постоянного тока. Величина колебаний составляет 10% и продолжается в течение 0,03 секунд. По этим данным можно судить о том, что блок суперконденсаторов не влияет на качественные характеристики питающего напряжения электропривода.

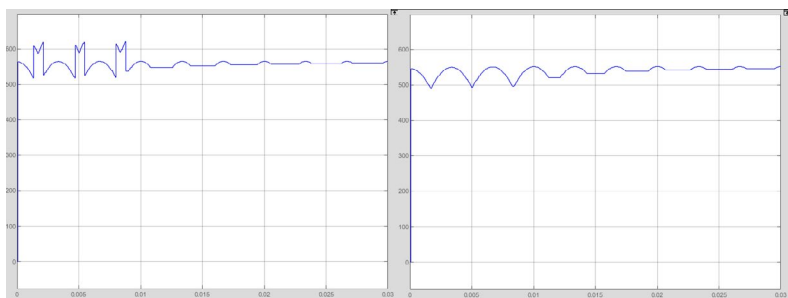


Рисунок 9 – Графика выпрямленного напряжения сети и комбинированного с блоком суперконденсаторов

Выводы

При электроснабжении электропривода горной промышленности, буровых станков, расположенных на значительном расстоянии от источников электропитания, возникают проблемы в пусковых режимах. Могут возникнуть недопустимые падения напряжения, что приводит к снижению пускового момента. В работе описана разработка математической модели частотно-регулируемого электропривода горных машин для эксплуатации в условиях удаленности от источников электроснабжения.

При падении напряжения больше 20 % реализация режима запуска под нагрузкой невозможна, что подтверждается имитационными экспериментами в статье. Для решения этой проблемы предлагается использование буферного накопителя энергии. Использование суперконденсатора в качестве буферного источника электрической энергии в звене постоянного тока частотного преобразователя асинхронного двигателя при его пуске в районах удаленных от промышленных сетей позволяет компенсировать просадки напряжения в сети, обеспечивать удовлетворительные пусковые режимы.

Анализ имитационных экспериментов пуска асинхронного двигателя показал незначительное увеличение продолжительности переходного процесса, а также незначительное увеличение колебательности системы из-за увеличения значения перерегулирования, но при этом данные показатели качества переходного процесса остаются удовлетворительными.

Таким образом применение суперконденсаторов в роли буферных источников электроэнергии для пуска асинхронного двигателя от источника соизмеримой мощности является допустимым и расширяет применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в горной промышленности.

Направление дальнейших исследований заключается в анализе переходных процессов в моменты подключения и отключения суперконденсаторов. Также будет проведен анализ накопления энергии в виде рекуперации в процессе работы. Предполагается разработка буферного источника.

Список использованных источников

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, P. 211–226, ISSN 1726-9687.

2 **Dewangan, Anamika & Sharma, Virendra.** (2017). SVPWM Techniques Used for Controlling Three-Phase Induction Motor Energized by Renewable Energy Source. 3297. 2320–3765. 10.15662/IJAREEIE.2017.0602017.

3 **Shevyrev, Yu & Morgachev, D.** (2015). Analysis of electromagnetic compatibility between diesel engine power plant and main electric motor of drilling unit. Gornyi Zhurnal. 2015. 10.17580/gzh.2015.01.11.

4 **Abramov, B.I. & Derzhavin, D.A. & Churikov, D. & Novoselov, Yu.B. & Suslov, M.A. & Shevyrev, Yu.V.** (2016). Instrumental studies of the electrical energy quality for oil field under conditions of widespread application of frequency-regulated electrical drives. 90–92.

5 **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.

6 **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.

7 **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.

8 **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.

Материал поступил в редакцию 11.12.20.

Р. Ф. Сайфулин, И. В. Брейдо

Буферлік қуат көздерін қолдана отырып, жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің іске қосу режимдерін талдау

Қарағанды техникалық университеті,
Қазақстан Республикасы, Қарағанды қ.
Материал баспаға 11.12.20 түсті.

R. F. Saifulin, I. V. Breido

Analysis of starting modes in frequency controlled asynchronous electric drive using buffer power supplies

Karaganda Technical University,
Republic of Kazakhstan, Karaganda.
Material received on 11.12.20.

Орта және Орталық Азия аймақтарының тау-кен өндірісінде асинхронды электр жетегін пайдаланудың қиындығы осы объектілердің өнеркәсіптік желілерден алыс аудандарда орналасқандығымен байланысты. Осыған байланысты электр желілерінің ұзындығы рұқсат етілгеннен асып кетуі мүмкін және желідегі кернеудің айтарлықтай төмендеуі байқалады.

Жұмыста Simulink Matlab 2019 бағдарламасында екі фазалы модельге айналдырылған үш фазалы жиілікті реттейтін асинхронды электр жетегінің моделі жасалды. Жүктеме кезінде іске қосу режимдеріндегі кернеудің төмендеуін жиілікті түрлендіргіштегі тұрақты ток байланысының шығысына қосылған буферлік қуат көзі

ретінде суперконденсаторларды қолдану арқылы өтеу ұсынылады. Әр түрлі қуат кернеуінде және суперконденсаторлар блогын қосудың әртүрлі тәсілдерінде имитациялық модельдеу жасалды.

Электр энергиясының қосымша көзін жүзеге асырудың мұндай принципі асинхронды электр жетектерін өнеркәсіптік желілерден алыс аудандарда олардың статикалық және динамикалық сипаттамаларына айтарлықтай әсер етпестен іске қосуға мүмкіндік береді.

Кілтті сөздер: электр қозғалтқышы; модельдеу; Matlab Simulink; суперконденсатор; уақытша сана.

The operation of an asynchronous electric drive for mining production in the regions of Central and Middle Asia is complicated by the fact that these facilities are located in remote from industrial networks areas. Because of this, the length of power lines can exceed the permissible length and there is a significant voltage drop in the network.

In this paper the model of three-phase frequency-controlled asynchronous electric drive is developed using Simulink Matlab 2019 and converted into a two-phase model. It is proposed to compensate the voltage drop in the network for electric drive's starting modes with load by using Supercapacitors as a buffer power supply connected to the output of a DC link in a frequency converter. Simulation modeling was done at various supply voltages and various methods of connecting the Supercapacitor unit.

It was found that such a principle of implementing an additional source of electrical energy allows to start asynchronous electric drives in areas remote from industrial networks without significantly affecting their static and dynamic characteristics.

Keywords: Electric drive; modeling; Matlab Simulink; Supercapacitor; transient response.

Теруге 11.12.2020 ж. жіберілді. Басуға 17.12.2020 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

3,99 Mb RAM

Шартты баспа табағы 26,6. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Шукурбаева

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3715

Сдано в набор 11.12.2020 г. Подписано в печать 17.12.2020 г.

Электронное издание

3,99 Mb RAM

Усл. печ. л. 26,6. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Шукурбаева

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3715

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

e-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik.tou.edu.kz