

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ



УДК 621.311:621.867.2

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62

ПРИМЕНЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОМПЕНСАТОРА ИСКАЖЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ МНОГОДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия
dzyuin.d@gubkin.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в решении проблемы негативного влияния искажений напряжения на системы электропривода ленточных конвейеров, вызываемой нарушением формы кривой напряжения в системах электроснабжения предприятий угледобывающего комплекса. ЦЕЛЬ работы заключается в разработке математической и компьютерной модели, иллюстрирующей эффективность применения динамического компенсатора искажений напряжения (ДКИН) для системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера, питающейся от подземной электрической сети. МЕТОДЫ. В качестве объекта исследования рассмотрена многодвигательная электромеханическая система из трёх низковольтных асинхронных двигателей BA280S4 суммарной мощностью 330 кВт, составляющая электропривод шахтной ленточной конвейерной установки 2Л100У-01. Исследование работы ДКИН в рассматриваемой электромеханической системе выполнено методом компьютерного моделирования данной системы в программной среде MATLAB/Simulink®. РЕЗУЛЬТАТЫ. Моделирование работы системы с ДКИН и с его отсутствием выполнено для следующих режимов: исследование статической устойчивости системы при снижении величины напряжения сети до 0,5 о.е. от номинального; исследование динамической устойчивости системы при исчезновении напряжения сети в течение до 8 с; возникновение несинусоидальности и несимметрии напряжения в течение 1-2 с. Результаты моделирования подтверждают, что без применения ДКИН работа привода конвейера в условиях несимметрии напряжения характеризуется многократными перегрузками по моменту, а в случаях снижения напряжения до 0,5 о.е. от номинального или его исчезновения на время более 8 с – потерей устойчивости по скорости. Применение ДКИН обеспечивает восстановление формы кривой напряжения и устойчивость переходных характеристик по скорости и по моменту привода. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Проведённое исследование показывает, что ДКИН является эффективным способом обеспечения устойчивого и надёжного функционирования низковольтных многодвигательных электроприводов конвейерных установок высокопроизводительных угольных шахт. Обоснована рекомендация к внедрению ДКИН на предприятиях угледобывающего комплекса.

Ключевые слова: динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН); форма кривой напряжения; подземные электрические сети; ленточный конвейер; многодвигательный электропривод; электромеханическая система; качество электроэнергии.

Для цитирования: Дзюин Д.В., Скопин Г.А., Комков А.Н., Дмитриева В.В. Применение динамического компенсатора искажений напряжения в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 2. С. 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER APPLICATION IN THE MULTI-MOTOR ELECTRIC DRIVE SYSTEM OF A BELT CONVEYOR

Dzyuin D.V., Skopin G.A., Komkov A.N., Dmitrieva V.V.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia

dzyuin.d@gubkin.ru

Abstract: *RELEVANCE* of this research lies in addressing the issue of the voltage distortions' negative impact on belt conveyor electric drive systems, caused by irregularities in the voltage waveform of power supply networks at coal mining facilities. *THE PURPOSE* of this study is to create a mathematical and computer model that demonstrates the effectiveness of using a dynamic voltage restorer (DVR) in a belt conveyor multi-motor electrical drive system powered by an underground electrical network. *METHODS.* A multi-motor electromechanical system consisting of three BA280S4 low-voltage asynchronous motors with a total power of 330 kW making up the electric drive for the 2L100U-01 mining belt conveyor system is the object of this research. The study of the DVR operation in the electromechanical system under consideration was carried out by computer modeling using the MATLAB/Simulink® software. *RESULTS.* Simulation of system operation with the DVR and without it was performed for the following modes: studying the static stability of the system when the grid voltage reduces to 0.5 pu of its nominal value, studying the dynamic stability when the grid voltage fails for up to 8 seconds, the occurrence of non-sinusoidal and asymmetric voltage waveforms for 1-2 seconds. The simulation results confirm that, without the use of a DVR, the operation of the conveyor drive under voltage asymmetry conditions is characterized by multiple torque overloads, and in cases where voltage is reduced to 0.5 pu of the nominal value or is cut off for more than 8 seconds, there is a loss of speed stability. The use of the DVR ensures the restoration of the voltage waveform and the stability of the transient characteristics of drive speed and torque. *CONCLUSION.* The conducted research illustrates that the DVR is an effective way to ensure stable and reliable operation of low-voltage multi-motor electric drives in high-performance coal mining belt conveyor facilities. The introduction of a DVR is reasonably recommended for coal mining enterprises.

Keywords: *dynamic voltage restorer (DVR); voltage waveform; underground electric networks; belt conveyor; multi-motor electric drive; electromechanical system; power quality.*

For citation: Dzyuin D.V., Skopin G.A., Komkov A.N., Dmitrieva V.V. Dynamic voltage restorer application in the multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (2): 49-62. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-2-49-62.

Введение и литературный обзор (Introduction and Literature Review)

Анализ электропотребления предприятий угледобывающего комплекса [1] показывает, что примерно 57% потребителей электроэнергии относятся к подземным выработкам, куда входит энергоемкое технологическое оборудование комплексно-механизированных забоев, конвейерного транспорта, подготовительных и вспомогательных процессов. Как указывают отечественные [2] и зарубежные [3] источники, надёжность и экономическая эффективность горнодобывающего предприятия зависит от согласованности составляющих ее элементов, поэтому выход из строя любой составляющей приводит к нарушению непрерывности технологического процесса, простоя оборудования, и, в результате, к уменьшению объёма и увеличению себестоимости добычи. В целях снижения эксплуатационных издержек и эффективного функционирования предприятий угледобывающего комплекса, подземные электрические сети должны обеспечивать бесперебойное электроснабжение всей технологической цепочки с обязательным соблюдением показателей качества электроэнергии по ГОСТ 32144-2013 [1, 4].

Как показывают исследования системы электроснабжения угольных шахт АО «СУЭК-Кузбасс» в работе Л.А. Плащанского и др. [1], данные по Забайкальской электроэнергетической системе в работе В.В. Романовой и др. [2], а также работы Ю.А. Сычева и др. [4], О. Sinyavsky и др. [5], форма кривой напряжения в подземных электрических сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса характеризуется

несимметрией и несинусоидальностью по причине большого количества нелинейной нагрузки, в состав которой входят преобразовательные устройства. Значения величин отклонения напряжения, коэффициента несимметрии, коэффициента гармонических искажений синусоиды превышают регламентированные ГОСТ 32144-2013 показатели в 2-3 раза [2]. Примерно 80% нагрузки в подземных электрических сетях составляют системы асинхронного электропривода производственных механизмов [1, 2], на которые оказывают негативное влияние искажения напряжения: как показывают результаты недавних исследований, электрические потери возрастают на 20% [4], срок службы асинхронных двигателей снижается в 2 раза [6], что приводит к дополнительным затратам на реновацию оборудования.

Наибольший потенциал повышения энергоэффективности предприятий угледобывающего комплекса рассматривается отечественными [7] и зарубежными [5, 8] исследователями в части эксплуатации электропривода шахтных ленточных конвейеров, поскольку, согласно обобщённым заявлениям горнодобывающих компаний, транспортировка вскрышных пород и угля из шахты составляют примерно половину общих производственных затрат на одну тонну добытого угля. В процессе эксплуатации высокопроизводительных ленточных конвейеров в условиях нарушений электроснабжения, электрическая часть привода подвергается перегрузкам, что обязательно передаётся на механическую часть, приводя к нарушению непрерывности технологического процесса транспортировки груза, внеплановым остановкам конвейера, снижению срока службы привода и ленты, и, следовательно, к значительным экономическим убыткам [8]. В случае многодвигательного привода конвейерной установки изменение условий эксплуатации системы не позволяет однозначно оценить эффективность её работы по причине взаимного влияния электродвигателей друг на друга. Как показано в работе А.А. Реутова [7], схема привода конвейера с тремя двигателями не обладает эффективностью ни по одному из обобщённых показателей в неопределённых условиях эксплуатации. Поэтому проблема повышения качества электроэнергии в системах многодвигательного электропривода ленточных конвейеров имеет особую актуальность.

На сегодняшний день исследователи рассматривают применение активных, пассивных или гибридных устройств компенсации искажений напряжения как наиболее доступное решение проблемы повышения качества электроэнергии [1, 4]. Как показывают в своей работе В.И. Зацепина и др. [9], максимальную эффективность имеет способ комплексного динамического подавления всех искажений кривой напряжения, включающих в себя провалы, перенапряжения и высшие гармоники. Вероятность и характер искажений напряжения не подлежат достаточно точному прогнозированию, поэтому для повышения качества электроэнергии требуются универсальность и максимальное быстроедействие компенсирующего устройства.

Обзор вышедших в последние годы статей отечественных [4, 9, 10] и зарубежных [11-14] авторов показывает, что современным и хорошо зарекомендовавшим себя устройством коррекции качества электроэнергии для систем мощностью не более 1 МВА является динамический компенсатор искажений напряжения (ДКИН). Данное устройство реализует восстановление формы кривой напряжения путём непрерывной подачи в сеть дополнительной величины напряжения компенсации через активное преобразовательное устройство и вольтодобавочный трансформатор. Будучи активным компенсатором, ДКИН превосходит пассивные фильтрокомпенсирующие устройства по быстротедействию, по качеству переходных процессов и по числу реализуемых функций в области компенсации высших гармоник тока и напряжения, отклонений величины напряжения [4, 11, 12]. При возникновении КЗ во внешней сети ДКИН способен устранить возникший провал на стороне низшего номинального напряжения [10]. Усовершенствование стратегии управления ДКИН путём перехода от пропорционально-интегрального регулятора к скользящему режиму управления позволяет сократить продолжительность и величину провала напряжения на 30% [13], а коэффициент суммарных гармонических искажений напряжения до значения 0,38% [14].

Внедрение ДКИН в системы электроснабжения угольных шахт на группу отдельных потребителей позволило бы создать резерв в системе электропотребления; установить пиковые нагрузки на сеть с последующим их перераспределением для максимального повышения эффективности угледобычи, поскольку каждая шахта как производственная система обладает значительным резервом для перераспределения мощности [3].

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвящённых

энергетической эффективности ДКИН в системах электроснабжения, в том числе в сетях предприятий минерально-сырьевого комплекса, на данный момент остаётся неисследованной целесообразность применения ДКИН в системах многодвигательного электропривода ленточных конвейеров с целью устранения негативного влияния искажений напряжения на работу электромеханической системы. Исходя из вышеизложенного, авторами статьи было предложено применение ДКИН в системе низковольтного многодвигательного электропривода шахтной ленточной конвейерной установки. Группа из трёх приводных асинхронных двигателей BA280S4 суммарной мощностью 330 кВт является нагрузкой в рассматриваемой электротехнической системе.

Основная цель данной работы состоит в разработке математической и компьютерной модели, иллюстрирующей технологическую эффективность внедрения ДКИН в систему многодвигательного электропривода ленточного конвейера. Для достижения цели в данной работе решены следующие задачи:

1. Проведён анализ современной литературы и выбрана методика математического моделирования ДКИН и электромеханической системы;
2. Разработана математическая модель ДКИН, ленточного конвейера и системы электроснабжения, а также соответствующая ей компьютерная модель в программной среде MATLAB/Simulink®;
3. Выполнено компьютерное моделирование рассматриваемой системы с ДКИН и с его отсутствием для различных видов нарушения формы кривой напряжения, изучено влияние искажений напряжения на электрическую и механическую часть привода при наличии и отсутствии динамической компенсации этих искажений;
4. Проанализированы результаты моделирования, по которым оценена эффективность применения ДКИН в системах низковольтных многодвигательных электроприводов шахтных ленточных конвейеров.

Научная значимость выполненной работы заключается в используемом методологическом подходе к обоснованию технологической эффективности применения ДКИН в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера. Предложено рассмотрение влияния искажений напряжения с компенсацией и без неё непосредственно на механическую часть привода конвейера, включающую в себя приводные барабаны и ленту.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке математической модели ДКИН и ленточной конвейерной установки, в выявлении критических значений провалов напряжения для рассматриваемой электромеханической системы, в определении рекомендуемых режимов работы ДКИН, способствующих поддержанию работоспособности многодвигательного привода ленточного конвейера.

Материалы и методы (Materials and methods)

Объектом представленного в данной работе экспериментального исследования является ленточная конвейерная установка марки 2Л100У-01 от изготовителя АО «Завод имени М.И. Платова» с максимальной производительностью 850 т/ч, длиной поставки 1500 м и шириной ленты 1000 мм. Технологические схемы и технические характеристики данного конвейера приведены в [15]. Рассматриваемая конвейерная установка имеет систему двухбарабанного асинхронного редукторного электропривода напряжением 0,4 кВ, укомплектованную тремя асинхронными двигателями марки BA280S4 мощностью по 110 кВт каждый.

Перед внедрением устройства динамической компенсации искажений напряжения в существующую электротехническую систему осуществляется выбор модификации ДКИН. На практике наиболее успешным и рациональным в использовании показывает себя ДКИН с источником питания и преобразовательным устройством, что позволяет повысить отказоустойчивость системы в случае возникновения внештатных ситуаций на линии независимого питания и обеспечить независимость кратковременной работы самого устройства [12]. Исходя из необходимости повышения надежности и обеспечения устойчивой работы системы электропривода, был выбран вариант размещения устройства ДКИН на стороне низшего напряжения с применением вольтодобавочного трансформатора, инвертора на IGBT и источника питания в виде комплекса аккумуляторных батарей совместно с шестипульсным выпрямителем звезда-Ларионов. Данный выбор также обусловлен возможностью сохранить преимущества использования ДКИН при значительном сокращении затрат. Схема предложенного устройства ДКИН, внедрённого в электротехническую систему, представлена на рисунке 1.

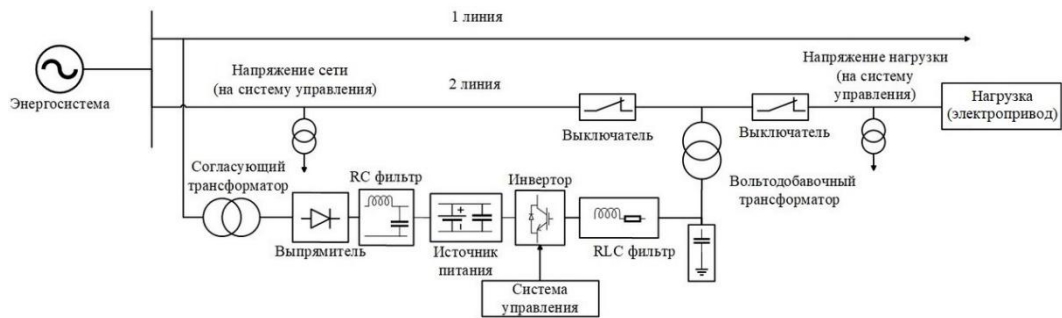


Рис. 1. Схема устройства динамической компенсации искажений напряжения в электротехнической системе

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Электротехническая и электромеханическая система на рисунке 1 требует исследования режимов её работы с возможностью проведения серии экспериментов, включающих в себя задание ненормальных исходных параметров, расчёт значений исследуемых величин, построение переходных характеристик и анализ полученных данных. Поэтому в данной работе исследование выполнено методом математического описания рассматриваемого объекта и последующего компьютерного моделирования в программном комплексе MATLAB/Simulink®.

Принцип работы ДКИН заключается в двойном преобразовании напряжения и дальнейшей передаче недостающей части напряжения на нагрузку. Первоначально осуществляется питание накопителя электроэнергии с шинпровода низшего напряжения через согласующий трансформатор и выпрямитель. Первичное преобразование напряжения, реализуемое выпрямителем, описывается формулой (1):

$$U_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot U_m, \quad (1)$$

где U_{dc} – среднее значение постоянного напряжения на выходе выпрямителя, U_m – амплитуда величины переменного напряжения после согласующего трансформатора.

Полученное по (1) постоянное напряжение U_{dc} на выходе выпрямителя подвергается фильтрации и в дальнейшем преобразуется инвертором в переменное. Используемая двухуровневая шестипульсная мостовая схема инвертора на IGBT обеспечивает высокую скорость переключений и эффективность компенсации.

Управление устройством ДКИН осуществляется методом сравнения параметров, исходя из недостающего значения величины напряжения на входе системы управления (СУ). СУ отслеживает состояние напряжения сети и регулирует работу устройства методом модуляции пространственного вектора, который предполагает преобразование трёхфазных напряжений в двумерные координаты методом преобразований Кларк и Парка. Схема системы управления ДКИН представлена на рисунке 2.

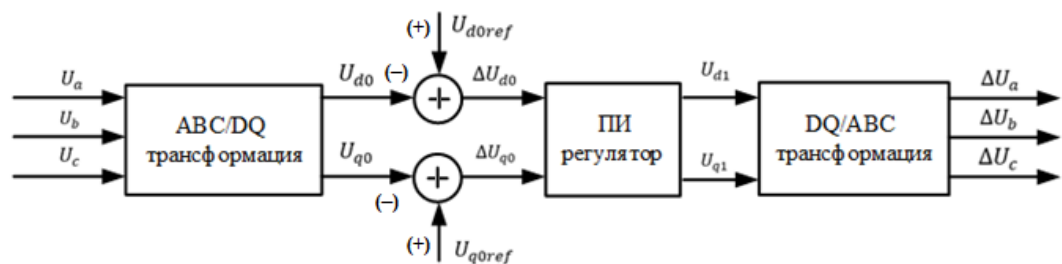


Рис. 2. Схема системы управления ДКИН методом модуляции пространственного вектора

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как показано на рисунке 2, номинальное фазное напряжение U_a , U_b , U_c , представленное в относительных единицах, подаётся на блок преобразования $abc \rightarrow dq0$, который реализует комбинированное преобразование Кларк и Парка. В ходе этого преобразования трёхфазный сигнал в координатах abc , совместно с параметром ωt – опорным фазовым углом, задаваемым виртуальной фазовой автоподстройкой частоты (ФАПЧ), – преобразуется в синхронные координаты $dq0$. Использование виртуального ФАПЧ обусловлено его способностью имитировать выход реального устройства,

основываясь на заданных параметрах частоты сети 50 Гц, в отличие от классического ФАПЧ, который динамически подстраивает частоту в соответствии с входным сигналом. Это упрощает компьютерное моделирование, так как фокус исследования не направлен на динамическое отслеживание фазового или частотного рассогласования.

Таким образом, трёхфазная синусоидальная система напряжений в новой системе координат представляется вектором с фиксированными проекциями на оси, синхронно поворачивающиеся на угол ωt . Комбинированное преобразование Кларк и Парка можно описать формулой (2):

$$U = \begin{bmatrix} U_{d0} \\ U_{q0} \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\omega t) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

После выполнения вышеописанного преобразования (2) полученный сигнал поступает на селектор, отделяющий необходимые далее проекции d и q , на базе которых производится управление ДКИН. Тогда, с учетом возникшего отклонения, конечная матричная функция примет вид (3):

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta U_{d0} \\ \Delta U_{q0} \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} = U_{ref} - U = \begin{bmatrix} U_{d0ref} - U_{d0} \\ U_{q0ref} - U_{q0} \\ U_{0ref} - U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - U_{d0} \\ 0 - U_{q0} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где U_{ref} – вектор проекций опорных значений напряжения, равный (4):

$$\begin{bmatrix} U_{d0ref} \\ U_{q0ref} \\ U_{0ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В данном случае U_{ref} принимает значения (4) исходя из того, что сравнение значений в системе СУ происходит в относительных единицах. Продольная и поперечная составляющие опорного напряжения d и q равны 1 и 0 соответственно. В случае искажений напряжения, выходные сигналы U_{d0} и U_{q0} резко уменьшаются, вследствие чего сумматор в схеме на рисунке 2 определит отклонение значений U_{d0} и U_{q0} от номинальных.

Для повышения точности компенсации, после проведения сравнения отклонений напряжения от опорных значений, в схеме используется регулятор с пропорционально-интегральным (ПИ) законом управления. Пропорциональная K_p и интегральная K_i составляющие регулятора настроены по методу Зиглера-Никольса, который основан на использовании запасов устойчивости.

Значения проекций сигнала управления U_{d1} и U_{q1} на выходе ПИ-регулятора принимают вид (5):

$$\begin{cases} U_{d1} = K_p(\Delta U_{d0}) + K_i \int (\Delta U_{d0}) dt \\ U_{q1} = K_p(\Delta U_{q0}) + K_i \int (\Delta U_{q0}) dt \end{cases}. \quad (5)$$

После регулирования значения сигналов из (5) переходят в блок обратной трансформации Парка-Кларк $dq0 \rightarrow abc$, в результате чего по формуле (6) формируется вектор управляющего сигнала ΔU_{abc} :

$$\Delta U_{abc} = \begin{bmatrix} \Delta U_a \\ \Delta U_b \\ \Delta U_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{d1} \\ U_{q1} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Трёхфазный сигнал управления ΔU_{abc} поступает на блок широтно-импульсной модуляции (ШИМ), управляющий переключением полупроводниковых ключей инверторной части ДКИН. Напряжение на выходе транзисторов сглаживается и через вольтодобавочный трансформатор добавляется на сторону нагрузки, компенсируя недостающую часть напряжения сети.

Соответствующая математическому описанию компьютерная модель электротехнической системы с ДКИН и ленточным конвейером реализована в программной среде MATLAB/Simulink®, как показано на рисунке 3. Внутренняя структура блока модели ДКИН, описанная уравнениями (1)–(6), приведена в работе [16]. Математическая модель ленточного конвейера 2Л100У-01 и соответствующая ей компьютерная модель в MATLAB/Simulink® была разработана ранее в работе [15]. Компоненты трёхфазной электрической сети с возможностью двунаправленного обмена

электроэнергией моделируются блоками из библиотеки «Specialized Power Systems».

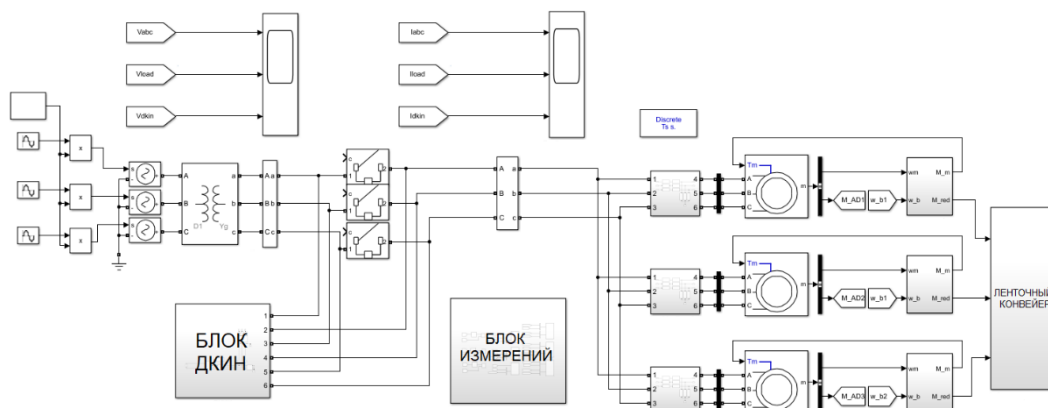


Рис. 3. Компьютерная модель электротехнической системы с ДКИН и ленточным конвейером 2Л100У-01 в MATLAB/Simulink®

Fig. 3. Computer model of an electric power system with the DVR and 2L100U-01 belt conveyor in MATLAB/Simulink®

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Разработанная компьютерная модель позволяет проводить имитационное моделирование переходных процессов по электрическим и механическим величинам в системе многодвигательного электропривода ленточного конвейера при заданных различных искажениях кривой напряжения сети.

Моделирование работы электротехнической системы с подключением устройства ДКИН и с его отсутствием выполнено для следующих режимов:

- 1) возникновение несинусоидальности и несимметрии напряжения при изменении амплитуды или гармонического состава напряжения в одной фазе в течение 1-2 с;
- 2) исследование статической устойчивости системы при снижении величины напряжения во всех трёх фазах до 0,5 о.е. от номинального;
- 3) исследование динамической устойчивости системы при полном прерывании напряжения во всех трёх фазах в течение до 8 с.

Остальные исходные параметры системы оставались неизменными на протяжении каждой итерации моделирования.

Результаты и обсуждение (Results and discussions)

Результаты компьютерного моделирования представлены на рисунках 4-10 в виде осциллограмм, иллюстрирующих изменения напряжения сети и нагрузки, а также переходные процессы по скорости и моменту привода и ленты конвейера при нарушениях электроснабжения в системе с ДКИН или без него.

Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях несимметрии и несинусоидальности напряжения сети без применения ДКИН (рис. 5а) иллюстрируют, что при наличии хотя бы в одной фазе продолжающихся в течение 1-2 с отклонений амплитуды напряжения на 0,1 о.е. от номинального значения, а также дополнительных гармоник напряжения с отклонением от основной частоты сети минимум на 5 Гц, имеют место просадки угловой скорости и 2-4-кратные превышения момента привода конвейера. Подключённый к электротехнической системе ДКИН полностью восстанавливает форму кривой напряжения на стороне нагрузки (рис. 4) с коэффициентом суммарных гармонических искажений по напряжению $THD = 3\%$, что гораздо ниже регламентированного ГОСТ 32144-2013 порогового значения $THD = 8\%$ для напряжения 0,4 кВ.

Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера при подключении ДКИН (рис. 5б) подтверждают, что при восстановлении формы кривой напряжения обеспечивается своевременное устранение всех продолжительных высокочастотных колебаний скорости и момента привода, вызванных нелинейными искажениями напряжения питающей сети. Колебания момента привода в установившемся режиме с полупериодом 15 с, а также обусловленные проскальзыванием ленты колебания угловой скорости точки ленты в течение 17-секундного пуска конвейера являются особенностями многомассовой системы, как было показано в [15], поэтому они не зависят от качества электроэнергии.

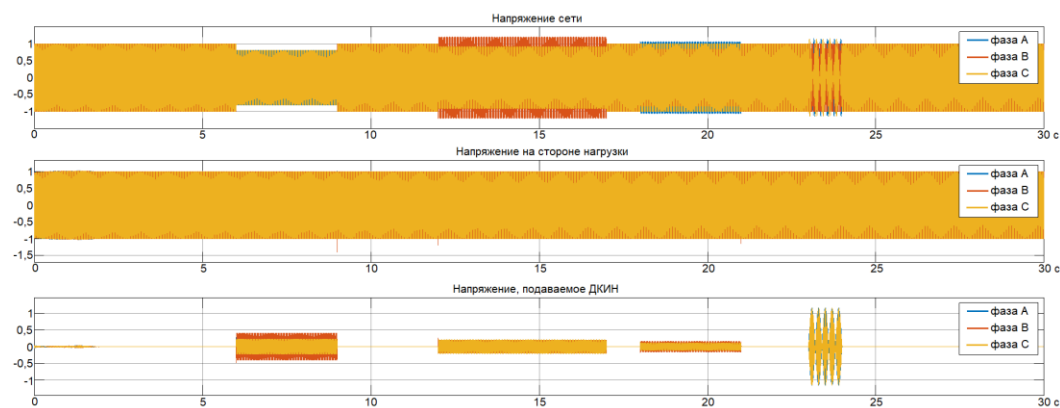


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на стороне сети, нагрузки и ДКИН при наличии несинусоидальности и несимметрии формы кривой напряжения сети

Fig. 4. Oscillograms of the power grid, load side and DVR voltage with non-sinusoidal and asymmetrical grid voltage waveform

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

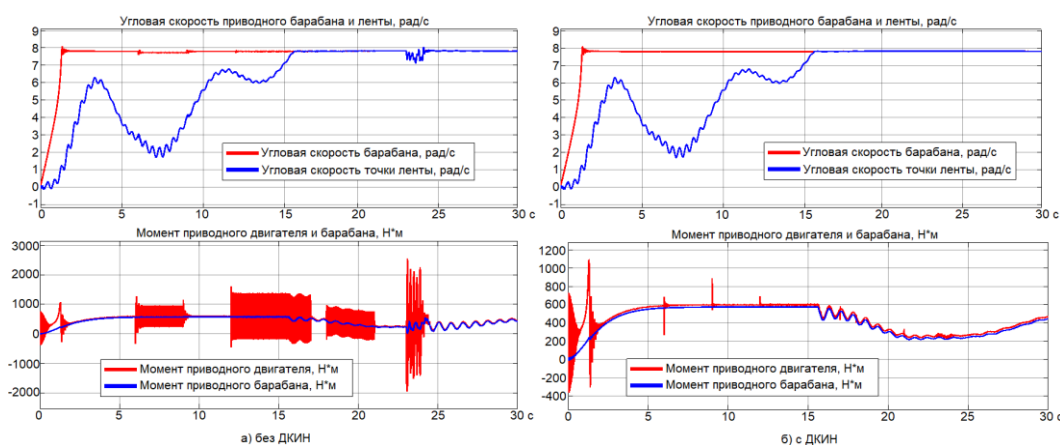


Рис. 5. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях несинусоидальности и несимметрии напряжения сети в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

Fig. 5. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of non-sinusoidal and asymmetrical grid voltage waveform in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 6-7 представлены осциллограммы напряжения, угловой скорости и момента электропривода конвейерной установки при исследовании статической устойчивости рассматриваемой системы. В ходе эксперимента напряжение сети было понижено до 0,5 номинальной величины с шагом 0,1 (рис. 6). В каждый момент времени, соответствующий снижению напряжения, в системе без ДКИН возникает значительная пульсация электромагнитного момента привода (рис. 7а), наличие же в системе ДКИН позволяет полностью восстановить напряжение на стороне нагрузки и исключить пульсации момента (рис. 6, рис. 7б). При снижении напряжения до 0,5 номинального и ниже в системе без ДКИН происходит нарушение устойчивости привода по скорости (рис. 7а), что на практике будет приводить к аварийному останову ленточного конвейера. При условии восстановления электроснабжения, за каждым внеплановым остановом следует тяжелый режим прямого пуска полностью загруженного конвейера.

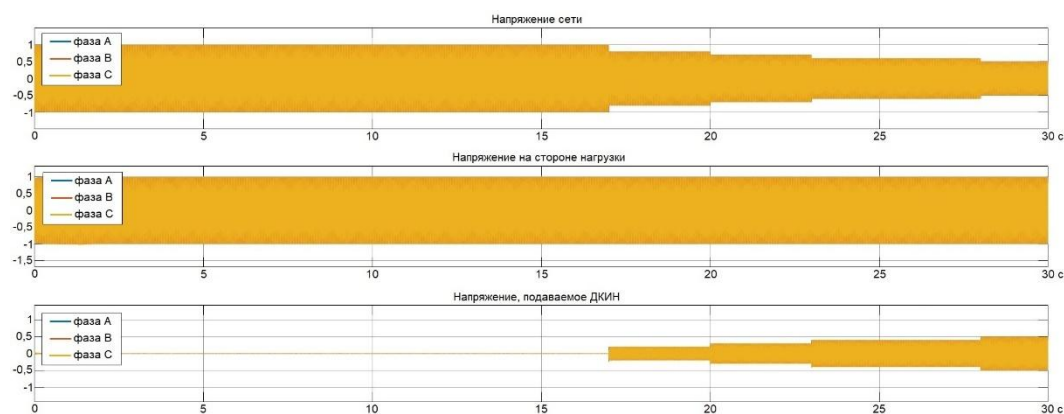


Рис. 6. Осциллограммы напряжения на стороне сети, нагрузки и ДКИН при снижении

Fig. 6. Oscillograms of the power grid, load side and DVR voltage under the conditions of the grid voltage reduction in order to study the static stability of the system

напряжения сети в целях исследования статической устойчивости системы

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

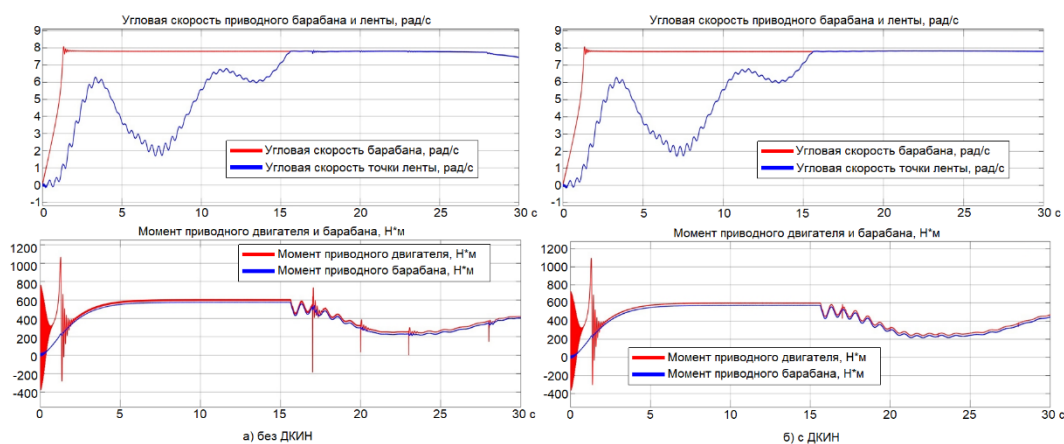


Рис. 7. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях снижения напряжения сети в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

Fig. 7. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of the grid voltage reduction in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунках 8-10 представлены осциллограммы напряжения, угловой скорости и момента электропривода конвейерной установки при исследовании динамической устойчивости рассматриваемой системы. В ходе серии экспериментов система электропривода ленточного конвейера, выведенная на номинальную скорость привода и ленты, была подвержена полному отключению напряжения сети на время от 1 с до 8 с.

Как показывают результаты моделирования (рис. 9), при последующем восстановлении электроснабжения после прерывания напряжения длительностью менее 8 секунд система электропривода способна вернуться к нормальному режиму работы. Серия опытов позволила установить, что если величина интервала отсутствия напряжения составляет минимум 4 с, то выход ленты на номинальную скорость сопровождается пробуксовкой (проскальзыванием) ленты на каждом приводном барабане (рис. 9а). Каждое прерывание сетевого напряжения характеризуется однократной пульсацией электромагнитного момента приводных двигателей, направленной против направления вращения вала и в 6 раз превышающей величину номинального момента привода.

При исчезновении напряжения в течение 8 с и более, система электропривода конвейера теряет устойчивость по скорости (рис. 10а). Компенсация прерываний напряжения устройством ДКИН (рис. 9б, рис. 10б) позволяет обеспечить динамическую устойчивость системы, сократить величину рассматриваемых пульсаций момента до двух- или трёхкратной от номинальной, а также полностью устранить просадки угловой скорости привода и пробуксовки ленты, вызванные нарушениями электроснабжения.

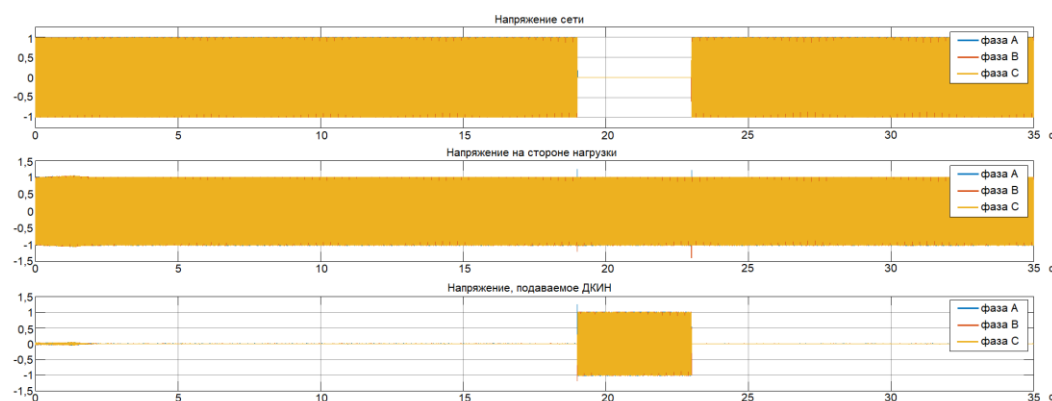


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на стороне сети, нагрузки и ДКИН при исчезновении напряжения сети в течение 4 с при исследовании динамической устойчивости системы

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 8. Oscillograms of the power grid, load side and DVR voltage under the conditions of the grid voltage failure for 4 s when studying the dynamic stability of the system

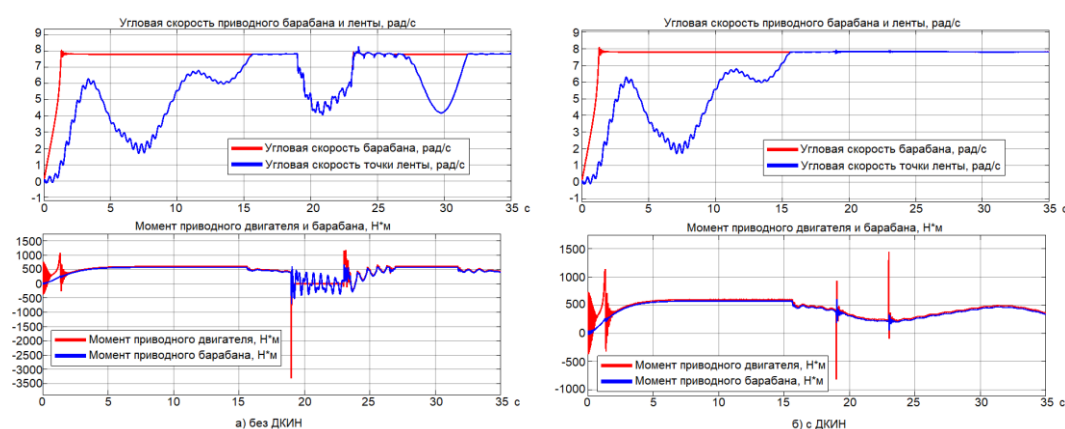


Рис. 9. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях исчезновения напряжения сети в течение 4 с в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 9. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of the grid voltage failure for 4 s in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

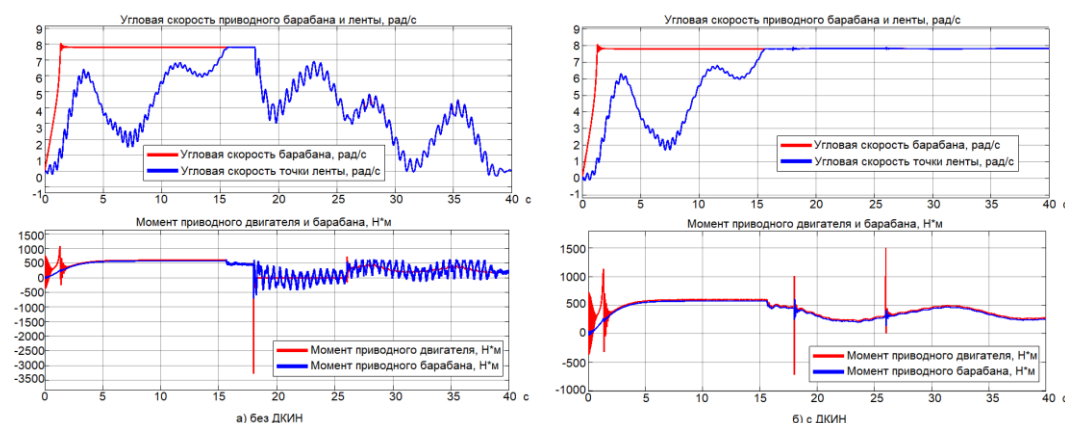


Рис. 10. Осциллограммы угловой скорости и момента привода конвейера в условиях исчезновения напряжения сети в течение 8 с в системе без ДКИН (а) и с ДКИН (б)

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Fig. 10. Oscillograms of the conveyor drive angular velocity and torque under the conditions of the grid voltage failure for 8 s in a system without the DVR (a) and with the DVR (b)

Переходя к оценке полученных результатов исследования, можно отметить, что использование устройства ДКИН показало значительное улучшение характеристик работы шахтного ленточного конвейера в условиях искажений формы кривой напряжения сети. Компьютерное моделирование позволило определить границу статической и

динамической устойчивости системы многодвигательного электропривода конвейерной установки 2Л100У-01, а также подтвердить, что ДКИН способен поддерживать устойчивость и работоспособность системы в условиях снижения напряжения питающей сети или кратковременных отключениях электроснабжения, что обычно приводит к нарушению устойчивости электротехнической системы без ДКИН. Результаты серии экспериментов продемонстрировали следующие преимущества внедрения ДКИН в рассматриваемую электротехническую систему:

1. ДКИН улучшает условия эксплуатации механической части электропривода при наличии несимметрии и несинусоидальности напряжения сети, так как своевременное восстановление формы кривой напряжения не допускает возникновения колебаний скорости и перегрузок по моменту привода. Поддержание регламентированных параметров напряжения на зажимах асинхронных двигателей приводит к меньшему перегреву обмоток, меньшему механическому износу оборудования и, следовательно, отвечает целям ресурсосбережения. ДКИН не способен устранить проскальзывание ленты относительно приводных барабанов в режиме пуска конвейера и колебания момента нагрузки при выходе на номинальную угловую скорость, так как данные особенности системы многодвигательного электропривода обусловлены характером механической нагрузки, а не формой кривой питающего напряжения.

2. ДКИН является эффективным средством повышения статической устойчивости системы электропривода ленточного конвейера. Граница статической устойчивости системы многодвигательного электропривода конвейера 2Л100У-01 по напряжению составляет 50% от номинального значения, но путём применения ДКИН при заданном уровне напряжения сети возможно обеспечить длительную и устойчивую работу привода, без изменения значений величин скорости и момента. Однако данный режим работы ДКИН, характеризующийся передачей на сторону нагрузки значительной мощности в течение длительного времени работы, возможен только при наличии резервной линии питания, что было обозначено ранее как одно из преимуществ выбора данной модификации.

3. Применение ДКИН улучшает динамическую устойчивость системы, что также основано на передаче недостающей мощности на сторону нагрузки. Минимальное время прерывания напряжения, при котором электропривод конвейера теряет устойчивость, равно 8 с, однако уже при 4-секундном прерывании напряжения режим самозапуска привода оказывается нежелательным, так как он сопровождается пробуксовкой ленты и 6-кратным превышением момента, что приводит к значительному износу оборудования. Использование ДКИН позволяет сохранить устойчивость системы по напряжению и скорости электропривода даже при длительных отключениях напряжения сети, при этом длительность устойчивой работы системы определяется только количеством имеющейся в резерве мощности.

Заключение (Conclusions)

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что применение устройства динамической компенсации искажений напряжения (ДКИН) является эффективным способом повышения устойчивости и надежности работы системы многодвигательного электропривода шахтной ленточной конвейерной установки. Выбранный методологический подход в виде компьютерного моделирования в среде MATLAB/Simulink® позволил выполнить сравнение режимов работы электротехнической системы с наличием и отсутствием устройства компенсации, и полученные результаты подтвердили технологическую эффективность применения выбранной модификации питания ДКИН от смежной линии. Внедрение данной модификации устройства ДКИН приводит к устранению значительного количества проблем, возникающих в системе электропривода ленточного конвейера как при кратковременных, так и при длительных искажениях напряжения подземной электрической сети. Это позволит избежать внеплановых отключений, аварий, простоев и снижений объемов транспортировки груза на угледобывающем предприятии, что приведет к значительной экономии денежных средств. Экономический эффект от внедрения устройства ДКИН на конкретном угледобывающем предприятии, в том числе срок его окупаемости, неоднозначен и в первую очередь зависит от величин внеплановых затрат, связанных с аварийными ситуациями, нарушениями технологического процесса транспортировки горной массы, изменением объемов добычи, преждевременной заменой или ремонтом оборудования.

Таким образом, внедрение ДКИН в существующие системы электроснабжения предприятий угледобывающего комплекса является перспективным решением для систем низковольтных многодвигательных электроприводов шахтных ленточных конвейеров.

При динамической компенсации искажений напряжения поддерживается номинальный и бесперебойный режим работы привода конвейера в условиях значительных нелинейных нагрузок на подземную электрическую сеть, приводящих к снижению качества передаваемой электрической энергии. Стабилизация работы ответственных участков конвейерного транспорта обеспечивает непрерывность технологического процесса добычи угля, что в свою очередь положительно сказывается на работе всей производственной инфраструктуры горнодобывающего предприятия. В долгосрочной перспективе внедрение устройств динамической компенсации искажений напряжения открывает новые возможности для повышения энергетической безопасности ответственных промышленных объектов и увеличения экономической эффективности предприятий, снижая наносимый искажениями сетевого напряжения ущерб технологическому процессу и электроприводному оборудованию.

Литература

1. Пляцанский Л.А., Решетняк С.Н., Решетняк М.Ю. Повышение качества электрической энергии в подземных электрических сетях высокопроизводительных угольных шахт // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7(1). С. 66-77. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77
2. Романова В.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В., Хромов С.В., Галятин В.А. Комплексная оценка факторов, воздействующих на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей угледобывающего комплекса // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 3-18. DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18.
3. Kolb A., Pazynich Y., Mirek A., Petinova O. Influence of voltage reserve on the parameters of parallel power active compensators in mining // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 201 (01024). 11 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101024
4. Сычев Ю.А., Аладьин М.Е., Зимин Р.Ю. Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 7. С. 164–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164
5. Sinyavsky O., Savchenko V., Liktey V., Bunko V. Influence of voltage unsymmetry on energy characteristics of belt conveyor // Energy and automation. 2022. № 4. 16 p. DOI: 10.31548/energiya2022.04.016.
6. Романова В.В., Хромов С.В., Батухтин А.Г., Суслов К.В. Анализ степени влияния несимметрии питающего напряжения на эксплуатационную надёжность низковольтных асинхронных электродвигателей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т. 24. № 4. С. 131-141. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141.
7. Реутов А.А. ВЫБОР СХЕМЫ ПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРА С УЧЕТОМ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ // Транспортное машиностроение. 2024. №. 3. С. 31-40. DOI:10.30987/2782-5957-2024-3-31-40
8. Bajda M., Hardygóra M., Marasová D. Energy efficiency of conveyor belts in raw materials industry // Energies. 2022. Vol. 15. № 9 (3080). 6 p. DOI: 10.3390/en15093080
9. Зацепина В.И., Зацепин Е.П., Скоморохов П.И. Повышение эффективности функционирования систем электроснабжения посредством комбинированного воздействия на искажения напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 5. С. 81-88. DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-79-86
10. Федотов А.И., Кузнецов Р.В., Федотов Е.А., Леухин А.Н. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2015. №. 3-4. С. 36-41. DOI: 10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41
11. Karuppannan A., Mohanaprasaath S. Design of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement // Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences. 2024. Vol. 08. Issue 2. Pp. 54-62. DOI: 10.46382/MJBAS.2024.8205
12. Liu A., Wang Y., Zhu Y., Park S.-J. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer // IET Power Electron. 2024. Vol. 17. Pp. 1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696
13. Abdelaal A.K., Shaheen A.M., El-Fergany A.A., Alqahtani M.H. Sliding mode control based Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation // Results in Engineering. 2024. Vol. 24 (102936). 12 p. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936
14. Zahra S.T., Khan R.U., Ullah M.F., Begum B., Anwar N. Simulation-based analysis of dynamic voltage restorer with sliding mode controller at optimal voltage for power quality enhancement in distribution system // Electrical Engineering & Electromechanics. 2022. Vol. 1. Pp. 64-69. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.1.09.
15. Дмитриева В.В., Дзюин Д.В. Математическая и компьютерная модель многомассовой

системы многодвигательного электропривода ленточного конвейера // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 2 (172). С. 3-12. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12

16. Скопин Г.А. Исследование режимов работы динамического компенсатора искажений напряжения в системе электроснабжения нефтеперерабатывающего завода // Новые технологии в газовой промышленности: газ, нефть, энергетика: XIV Всероссийская конференция молодых ученых, специалистов и студентов: тезисы докладов, Москва, 14–18 ноября 2022 года. Москва: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2022. С. 669-670.

Авторы публикации

Дзюин Дмитрий Владленович – аспирант, ассистент кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0007-0411-9948>. Email: dzyuin.d@gubkin.ru

Скопин Георгий Андреевич – аспирант кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. Email: asostrai@gmail.com

Комков Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. Email: komkov.a@gubkin.ru

Дмитриева Валерия Валерьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва, Россия. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8740-9380>. Email: dm-valeriya@yandex.ru

References

1. Plashchansky LA, Reshetnyak SN, Reshetnyak MY. Improvement of electric energy quality in underground electric networks of highly productive coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2022; 7(1):66–77. (In Russ). DOI: 10.17073/2500-0632-2022-1-66-77
2. Romanova VV, Batukhtin AG, Suslov KV, Khromov SV, Galyatin VA. Comprehensive assessment of factors affecting the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors of a coal mining complex. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26(5):3-18. (In Russ). DOI: 10.30724/1998-9903-2024-26-5-3-18
3. Kolb A, Pazynich Y, Mirek A, et al. Influence of voltage reserve on the parameters of parallel power active compensators in mining. *E3S Web of Conferences*. 2020; 201(01024):1-11. DOI: 10.1051/e3sconf/202020101024
4. Sychev YA, Aladin ME, Zimin RY. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022; 7:164-179. (In Russ). DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164
5. Sinyavsky O, Savchenko V, Liktey V, et al. Influence of voltage unsymmetry on energy characteristics of belt conveyor. *Energy and automation*. 2022; 4:1-16. DOI: 10.31548/energiya2022.04.016
6. Romanova VV, Khromov SV, Batukhtin AG, Suslov KV. Analysis of the degree of influence of supply voltage asymmetry on the operational reliability of low-voltage asynchronous electric motors. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2022; 24(4):131-141. (In Russ). DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-4-131-141
7. Reutov AA. CHOOSING THE CONVEYOR DRIVE LAYOUT TAKING INTO ACCOUNT UNCERTAIN OPERATING CONDITIONS. *Transport engineering*. 2024; (3):31-40. (In Russ). DOI: 10.30987/2782-5957-2024-3-31-40
8. Bajda M, Hardygóra M, Marasová D. Energy efficiency of conveyor belts in raw materials industry. *Energies*. 2022; 15(9):3080. DOI: 10.3390/en15093080
9. Zatsepina VI, Zatsepin EP, Skomorokhov PI. Improving the efficiency of power supply systems through the combined effect of voltage distortion. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(5):79-86. (In Russ). DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-5-79-86
10. Fedotov AI, Kuznetsov RV, Fedotov EA, Leuhin AN. Effect of dynamic compensators voltage distortion on the power quality during faults on the electrical networks. *Power engineering: research,*

equipment, technology. 2015; (3-4):36-41. (In Russ.) DOI: 10.30724/1998-9903-2015-0-3-4-36-41

11. Karuppannan A, Mohanaprasaath S. Design of Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement. *Mediterranean Journal of Basic and Applied Sciences*. 2024; 08(2):54-62. DOI: 10.46382/MJBAS.2024.8205

12. Liu A, Wang Y, Zhu Y, et al. Research on power quality improvement system based on dynamic voltage restorer. *IET Power Electron*. 2024; 17:1399–1410. DOI: 10.1049/pel2.12696

13. Abdelaal AK, Shaheen AM, El-Fergany AA, et al. Sliding mode control based Dynamic Voltage Restorer for Voltage Sag Compensation. *Results in Engineering*. 2024; 24(102936):1-12. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102936

14. Zahra ST, Khan RU, Ullah MF, et al. Simulation-based analysis of dynamic voltage restorer with sliding mode controller at optimal voltage for power quality enhancement in distribution system. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2022; 1:64-69. DOI: 10.20998/2074-272X.2022.1.09

15. Dmitrieva VV, Dzyuin DV. Mathematical and computer model of a multi-mass multi-motor electric drive system of a belt conveyor. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2024; 2(172):3-12 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-2-3-12

16. Skopin GA. Issledovanie rezhimov raboty dinamicheskogo kompensatora iskazhenii napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya neftepererabatyvayushchego zavoda [Study of the operating modes of a dynamic voltage distortion compensator in the power supply system of an oil refinery]. *Novye tekhnologii v gazovoi promyshlennosti: gaz, nef't, energetika: XIV Vserossiiskaya konferentsiya molodykh uchenykh, spetsialistov i studentov: tezisy dokladov, Moskva, 14–18 noyabrya 2022 goda*. Moscow: Rossiiskii gosudarstvennyi universitet nef'ti i gaza (natsional'nyi issledovatel'skii universitet) imeni I.M. Gubkina [National University of Oil and Gas «Gubkin University»], 2022. Pp. 669-670. (In Russ.).

Authors of the publication

Dmitry V. Dzyuin – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0009-0007-0411-9948>. Email: dzyuin.d@gubkin.ru

Georgy A. Skopin – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. Email: asostraik@gmail.com

Aleksandr N. Komkov – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-1010-6971>. Email: komkov.a@gubkin.ru

Valeria V. Dmitrieva – National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russia. ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8740-9380>. Email: dm-valeriya@yandex.ru

Шифр научной специальности: 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

Получено 16.01.2025 г.

Отредактировано 28.01.2025 г.

Принято 20.02.2025 г.