
4.3.2. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 621.311.24

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2024_3_119

EDN: UTJLWH

Использование устройств динамического восстановления напряжения в электрических сетях 0,4 кВ

Дмитрий Николаевич Афоничев^{1✉}, Сергей Николаевич Пилаев²,
Владимир Викторович Васильев³

^{1, 2, 3} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия

¹ dmafonichev@yandex.ru✉

Аннотация. В электрических сетях 0,4 кВ достаточно часто наблюдаются кратковременные нарушения качества электроэнергии в виде провалов или повышения напряжения, обусловленные структурой системы сельского электроснабжения. Такие кратковременные нарушения качества электроэнергии могут привести к техническим проблемам и сбою в работе современных электронных систем управления и контроля, уничтожению информации и, как следствие, к значительным экономическим потерям как у потребителей электрической энергии, так и операторов энергосистем. Для компенсации подобных нарушений качества электроснабжения у чувствительных потребителей целесообразно использование устройства динамического восстановления напряжения, которое включается последовательно с защищаемой нагрузкой. Для электрических сетей 0,4 кВ авторами предложено устройство, содержащее инжекторный трансформатор, вторичная обмотка которого включена последовательно с нагрузкой, преобразователь постоянного напряжения в переменное, фильтр высших гармоник, накопитель энергии и систему управления. Накопителем энергии является конденсатор, заряжаемый от сети через выпрямитель. Фильтр низких частот для простоты реализации выполняется в виде индуктивности в цепи инвертора и RC-цепи в первичной или вторичной обмотке инжекторного трансформатора. Выбран алгоритм управления устройством динамического восстановления напряжения, основанный на разложении пространственного вектора напряжения сети на ортогональные оси, вращающиеся с ее синхронной частотой. Для диагностики нарушения напряжения сети и синхронизации с мгновенным углом поворота вектора напряжения сети используется блок автоматической подстройки частоты. Компенсация нарушений качества напряжения осуществляется тремя пропорционально-интегральными регуляторами, которые формируют компенсирующее напряжение инвертора таким образом, чтобы обеспечивалось условие стандартного напряжения питания.

Ключевые слова: электрическая сеть, трансформатор, качество электрической энергии, устройство динамического восстановления напряжения, система управления, инвертор, компьютерная модель

Для цитирования: Афоничев Д.Н., Пилаев С.Н., Васильев В.В. Использование устройств динамического восстановления напряжения в электрических сетях 0,4 кВ // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 3(82). С. 119–132. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_3_119-132.

4.3.2. ELECTROTECHNICS, ELECTRICAL EQUIPMENT AND POWER SUPPLY FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

Dynamic voltage recovery devices and their application in 0.4 kV electrical networks

Dmitriy N. Afonichev^{1✉}, Sergey N. Pilyaev², Vladimir V. Vasiliev³

^{1, 2, 3} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia

¹ dmafonichev@yandex.ru✉

Abstract. In 0.4 kV electric networks, short-term violations of the quality of electricity in the form of failures or voltage increases due to the structure of the rural power supply system are quite often observed. Such short-term violations of the quality of electricity can lead to technical problems and malfunction of modern electronic control and control systems, loss of information, and as a result, to significant economic losses for consumers of electric energy and operators of power systems. To compensate for such violations of the quality of electricity in sensitive consumers, it is advisable to use a dynamic voltage recovery device that is switched on in series with the protected load. For use in 0.4 kV electrical networks, a device is proposed that includes an injection transformer, the secondary winding of which is connected in series with the load, a DC-to-AC voltage converter, a higher harmonic

filter, an energy storage device and a control system. The energy storage device is a capacitor charged from the mains via a rectifier. A low-pass filter for ease of implementation is performed in the form of an inductance in the inverter circuit and an RC circuit in the primary or secondary winding of an injection transformer. An algorithm for controlling a dynamic voltage recovery device based on the decomposition of the spatial vector of the network voltage into orthogonal axes rotating with its synchronous frequency is selected. An automatic frequency adjustment unit is used to diagnose a network voltage violation and synchronize with the instantaneous rotation angle of the network voltage vector. Compensation for voltage quality violations is carried out by three proportional-integral regulators, which form the compensating voltage of the inverter in such a way that the condition of the standard supply voltage is ensured.

Keywords: electrical network, transformer, electrical energy quality, dynamic voltage recovery device, control system, inverter, computer model

For citation: Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Vasiliev V.V. Dynamic voltage recovery devices and their application in 0.4 kV electrical networks. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(2):119-132. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_3_119-132.

Введение

На практике в электрических сетях 0,4 кВ достаточно часто наблюдаются кратковременные нарушения качества электроэнергии, такие как прерывание подачи напряжения, провалы и повышения напряжения, искажения формы напряжения и др. Согласно ГОСТ 32144-2013 [2] под качеством электрической энергии понимается степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы базовой совокупности ее нормированных показателей.

Как известно, нарушения качества электроэнергии могут приводить к техническим проблемам и сбою в работе современных электронных систем управления и контроля, уничтожению информации и, как следствие, к значительным экономическим потерям как у потребителей электрической энергии, так и операторов энергосистем [3, 6, 7].

Различные нарушения системы сельского электроснабжения обусловлены самой структурой такой системы, когда ряды самых разнообразных нагрузок включаются параллельно друг другу к вторичной обмотке трансформатора (рис. 1). В этом случае любые события в фидерах шины трансформаторной подстанции (короткие замыкания, включения и выключения нагрузок, пуск мощных электродвигателей, действия коммутационной и защитной аппаратуры и др.) приводят к появлению переходных процессов в системе, а следовательно, и к искажению кривой напряжения в других фидерах шины подстанции длительностью до 1 минуты. Такие кратковременные нарушения качества электроэнергии не страшны типичным сельскохозяйственным потребителям.

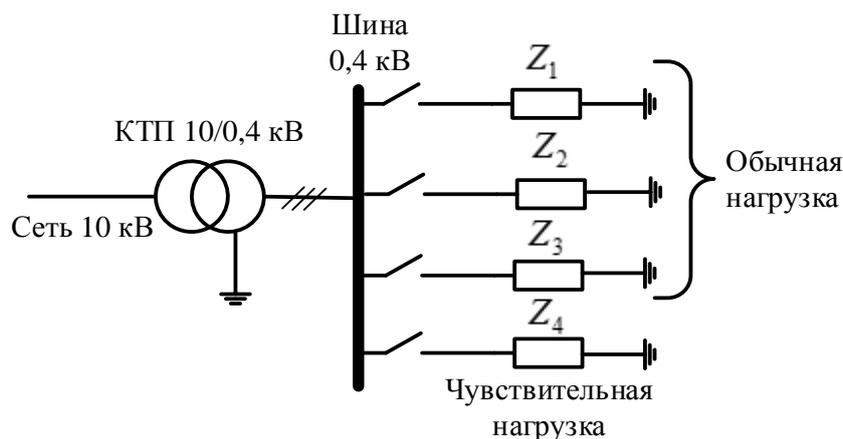


Рис. 1. Структура типовой трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ

В последние десятилетия в связи с бурным развитием современной электронной и микропроцессорной техники появилось значительное количество электроприемников, которые весьма чувствительны к изменению качества питающей их электрической энергии. Рассматриваемые кратковременные нарушения качества электроэнергии могут

стать причиной многих технических проблем, приводящих к сбою нормальной работы данных устройств, и, как следствие, к значительным экономическим потерям как для потребителей электрической энергии, так и для операторов энергосистем [6, 7, 10]. Поэтому проблема компенсации кратковременных нарушений качества электроэнергии для ряда «чувствительных» электроприемников становится актуальной.

Компенсация кратковременных нарушений качества электроэнергии посредством пассивных фильтров и устройств бесперебойного питания каждой чувствительной нагрузки не дает значительного эффекта и является экономически невыгодным подходом [9, 11, 13]. Предлагается использовать различные электронные устройства, которые позволяют повысить качество электроэнергии во всем фидере подстанции, в частности:

- распределительный синхронный компенсатор;
- динамический восстановитель напряжения;
- активный фильтр;
- унифицированный кондиционер качества электроэнергии [6, 9, 10].

Среди вышперечисленных устройств, с точки зрения эффективного использования в сельских электрических сетях 0,4 кВ наиболее предпочтительным является устройство динамического восстановления напряжения (DVR – Dynamic Voltage Restorer) [1, 6, 9, 11, 13], которое включается последовательно с защищаемой нагрузкой в сеть промежуточного или низкого напряжения, как это показано на рисунках 2, а и 2, б [1].

Основная функция устройства динамического восстановления напряжения (DVR) – это быстрое введение в систему электроснабжения или поглощение из системы электроснабжения энергии с целью предотвращения нарушения качества электроэнергии нагрузки при возникновении возмущений в системе.

Принцип действия устройства динамического восстановления напряжения DVR (рис. 3) заключается в том, что при появлении в сети (точка А) искажения напряжения (провал, перенапряжения, небаланс амплитуд фазного напряжения и др.) устройство генерирует свою электродвижущую силу (ЭДС), чтобы компенсировать эти искажения напряжения, стараясь поддерживать напряжение нагрузки (точка В) на заданном уровне, то есть выполняется следующее условие:

$$\vec{U}_B = \vec{U}_A + \vec{E}_{DVR}, \quad (1)$$

где \vec{U}_A, \vec{U}_B – пространственные векторы трехфазного напряжения сети (точка А) и на нагрузке (точка В);

\vec{E}_{DVR} – пространственный вектор компенсирующей ЭДС устройства динамической компенсации напряжения (DVR).

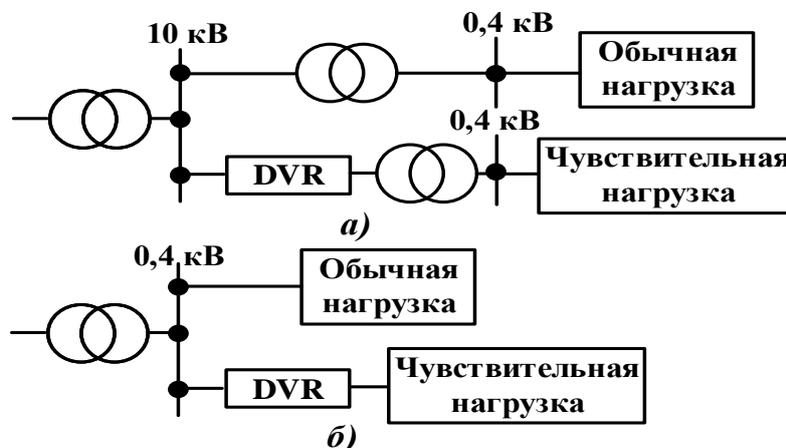


Рис. 2. Подключение устройства динамического восстановления напряжения (DVR) в сеть напряжением: а – 10 кВ; б – 0,4 кВ

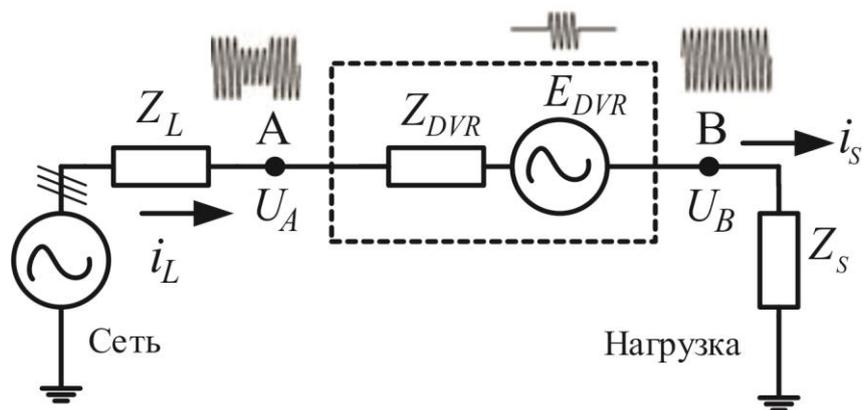


Рис. 3. Принцип действия устройства динамического восстановления напряжения (DVR)

Целью настоящей работы является обоснование структуры устройства динамического восстановления напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ и разработка рационального алгоритма управления данным устройством.

Методика исследований

Устройство динамического восстановления напряжения может иметь самую разнообразную структуру и алгоритм управления [9, 13], выбор которых определяется спецификой электрической сети 0,4 кВ и защищаемых нагрузок, а также экономическими соображениями. На рисунке 4 представлена возможная функциональная схема самого устройства DVR, основными компонентами которого являются устройство добавления напряжения, устройство генерации дополнительной ЭДС и источник электрической энергии для ее создания.

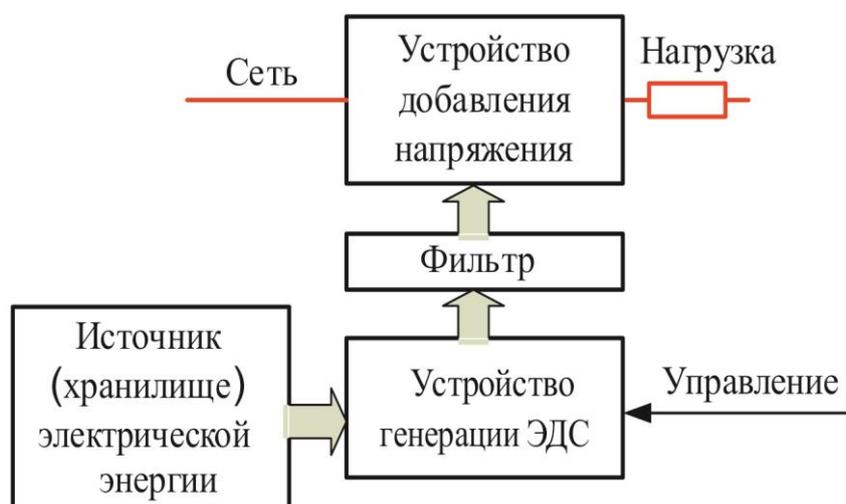


Рис. 4. Функциональная схема устройства динамического восстановления напряжения

В качестве устройства добавления напряжения чаще всего используются трансформаторы, трехфазные и однофазные, хотя известны и безтрансформаторные схемы [10]. В качестве источника электрической энергии для коррекции напряжения в сети могут быть использованы разнообразные схемы построения устройств динамического восстановления напряжения. На рисунке 5 показана классификация основных возможных структур DVR.



Рис. 5. Классификация основных возможных структур DVR

На рисунке 6 представлены наиболее распространенные типы устройств динамического восстановления напряжения (DVR).

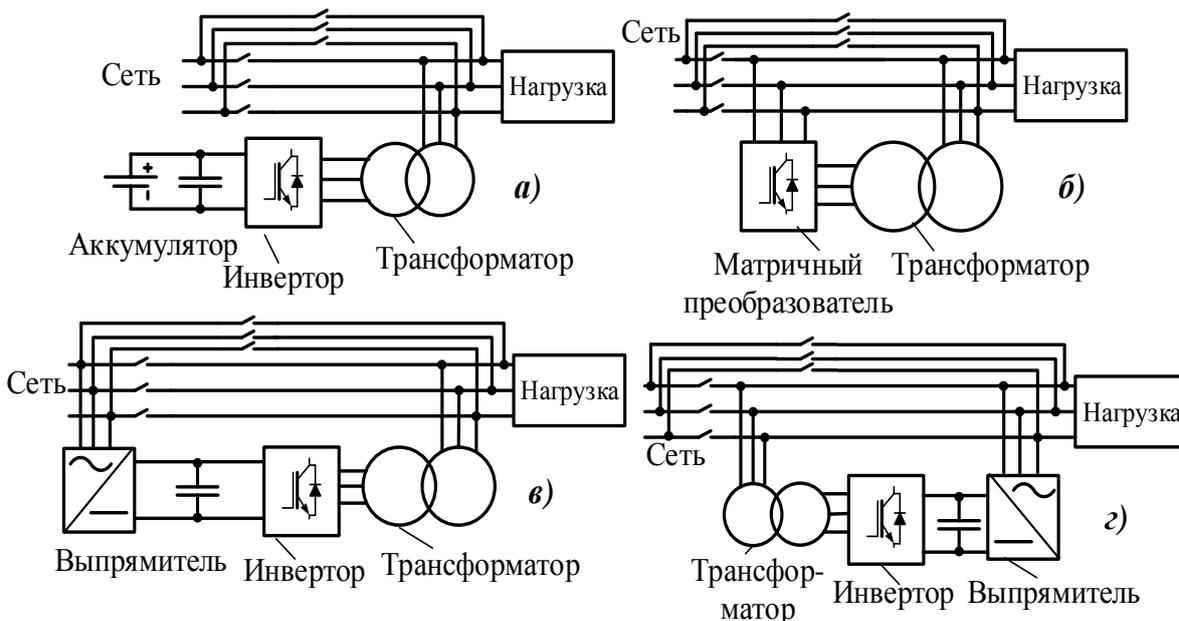


Рис. 6. Типы устройств динамического восстановления напряжения:
 а – с хранилищем электроэнергии; б – без хранилища электроэнергии;
 в – с питанием от сети; г – с питанием со стороны нагрузки

Система с внешним хранилищем электрической энергии (рис. 6, а) состоит из управляемого инвертора, питаемого от отдельного источника постоянного напряжения. DVR без источника электрической энергии использует в качестве устройства генерации дополнительной ЭДС либо матричный преобразователь переменного напряжения [10], питаемый от сети (рис. 6, б), либо традиционные инверторы с источником питания со стороны сети (рис. 6, в) или со стороны нагрузки (рис. 6, г).

Выбор конкретной структуры устройства динамического восстановления напряжения определяется спецификой защищаемых нагрузок и ограничениями техни-

ческого и экономического характера, поскольку все они имеют свои неоспоримые достоинства и недостатки. С точки зрения использования в сельских электрических сетях 0,4 кВ наиболее целесообразна структура DVR с хранилищем энергии в виде конденсатора большой емкости, заряжаемого через выпрямитель от сети (рис. 6, в).

На рисунке 7 представлена предлагаемая авторами функциональная схема управления устройством динамического восстановления и алгоритм ее работы.

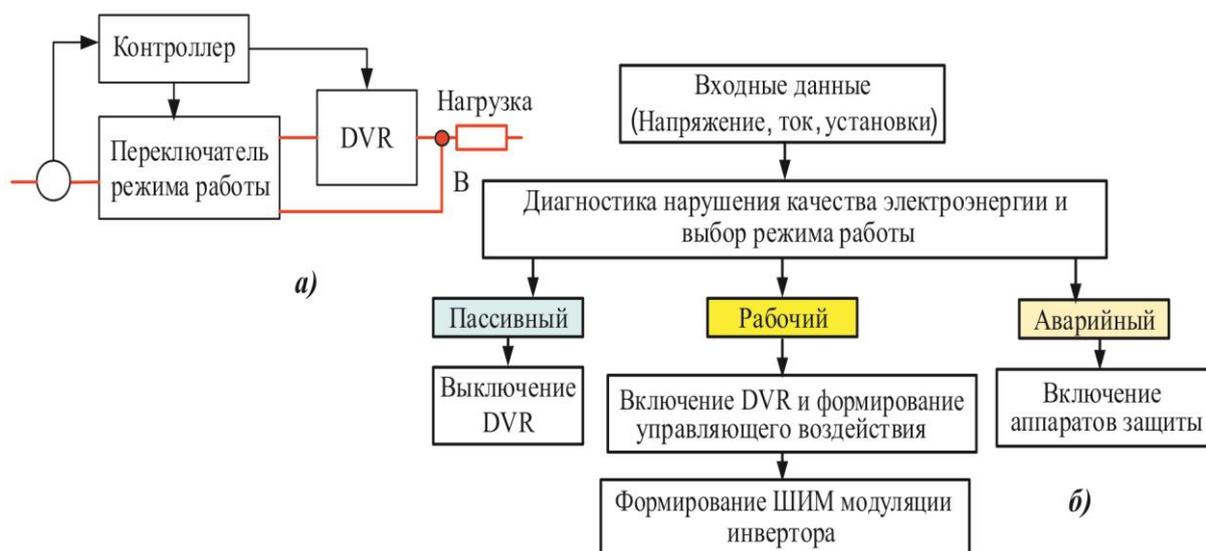


Рис. 7. Функциональная схема системы управления устройством динамического восстановления напряжения (а) и схема алгоритма ее работы (б)

Из принципа действия DVR в зависимости от сигналов датчиков напряжения и тока на его входе (точка А на рисунке 3) логично вытекают три режима его работы: защитный, рабочий и пассивный. Контроллер системы управления (рис. 7, а) оценивает параметры напряжения и тока в сети питания чувствительных нагрузок, и в случае их аварийных значений тока или напряжения выступает в качестве защитного аппарата, выключая их (защитный режим работы). При появлении провалов или повышений напряжения, или других его отклонений DVR компенсирует их согласно выражению (1). Это рабочий режим DVR. Если же отклонения напряжения питания отсутствуют, то для уменьшения потерь в сети DVR отключается и нагрузка питается непосредственно от сети (пассивный режим работы).

Система управления DVR должна решать несколько задач (рис. 7, б). Сначала с помощью датчиков тока и напряжения согласно заданным установкам определяется нарушение качества электроэнергии. Этот этап является решающим в процессе управления DVR, поскольку необходимо диагностировать и классифицировать нарушение качества электрической энергии. Для этих целей можно использовать все известные методы анализа электрических цепей, такие как вычисление пространственных векторов напряжения и тока, преобразования Фурье, вейвлет-преобразование, петлю фазовой синхронизации, нейронные сети и др. [9, 10]. Выбор того или иного метода диагностики является отдельной самостоятельной задачей, обусловленной видом защищаемой нагрузки, а также техническими и экономическими ограничениями.

При выборе пассивного режима работы DVR происходит его отключение от нагрузки, нагрузка запитывается напрямую от сети, но блок диагностики нарушений качества питающего напряжения продолжает свою работу. При наступлении аварийной ситуации происходит активация защитной аппаратуры и отключается нагрузка вместе с устройством DVR.

При обнаружении провалов или повышений напряжения в питающей сети устройство динамического восстановления переходит в рабочий режим генерации дополнительной компенсирующей ЭДС. Компенсация напряжения может осуществляться разными методами исходя из мощности DVR и чувствительности нагрузки к углу сдвига между током и напряжением, а поэтому возможны несколько стратегий компенсации провалов напряжения. Метод предварительной компенсации позволяет постоянно отслеживать напряжение питания и выявлять любые его нарушения, тем самым генерируя и подавая дополнительное напряжение. Таким образом, напряжение на нагрузке остается неизменным. Метод предварительной компенсации провала способен восстановить напряжение чувствительной нагрузки до такой же величины амплитуды и фазового угла, что и было номинальным напряжением до появления провала. Этот метод рекомендуется использовать для нелинейных нагрузок, которые очень чувствительны к скачкам фазового угла перемещения пространственного вектора напряжения. Для этого требуется более высокая мощность как самого DVR, так и его источника энергии, поскольку в этом методе активная и реактивная мощности компенсации поступают со стороны инвертора. На рисунке 8, а показана диаграмма пространственных векторов напряжений и токов для данного метода компенсации [4, 10, 12].

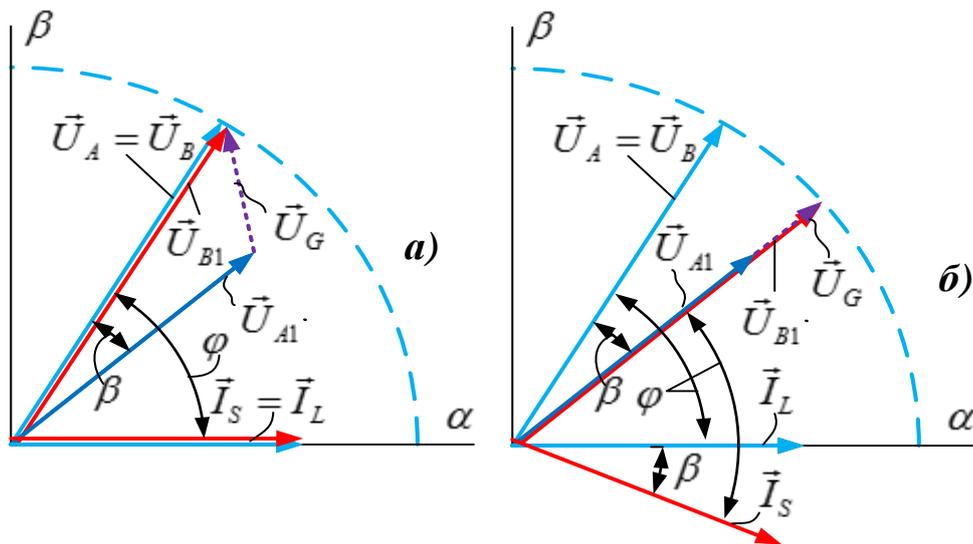


Рис. 8. Диаграммы пространственных векторов напряжений и токов:
 а – метод предварительной компенсации; б – метод синфазной компенсации

Обозначение векторов соответствуют схеме на рисунке 3:

\vec{U}_A, \vec{U}_B – пространственные векторы напряжений сети и нагрузки;

$\vec{U}_{A1}, \vec{U}_{B1}$ – векторы напряжения сети и нагрузки после провала или повышения напряжения;

\vec{U}_G – вектор генерируемого напряжения DVR;

\vec{I}_S, \vec{I}_L – векторы токов нагрузки и сети.

Вектор напряжения сети после его провала сдвигается на угол β в пространстве, но компенсация со стороны DVR приводит к тому, что вектор напряжения и вектор тока нагрузки остаются постоянными. В другом методе компенсации, синфазном, генерируемое DVR напряжение и питающее напряжения сети синфазны друг другу (рис. 8, б). Здесь компенсируются только амплитуда напряжения нагрузки и угол сдвига между током и напряжением на ней. Компенсации скачка пространственного угла β не проис-

ходит. Этот метод компенсации напряжения более прост в реализации, поэтому именно его целесообразно использовать в устройствах динамического восстановления напряжения для сельских электрических сетей 0,4 кВ.

Результаты и их обсуждение

Согласно выбранному методу компенсации рассчитывается амплитуда компенсирующего напряжения и соответствующими методами управления инвертором [8, 10] формируется пространственный вектор этого напряжения. Таким образом, для сельских электрических сетей 0,4 кВ целесообразно использовать устройство динамического восстановления напряжения, включающее инжекторный трансформатор, вторичная обмотка которого включена последовательно с нагрузкой, преобразователь постоянного напряжения в переменное, фильтр высших гармоник, накопитель энергии и систему управления (рис. 9).

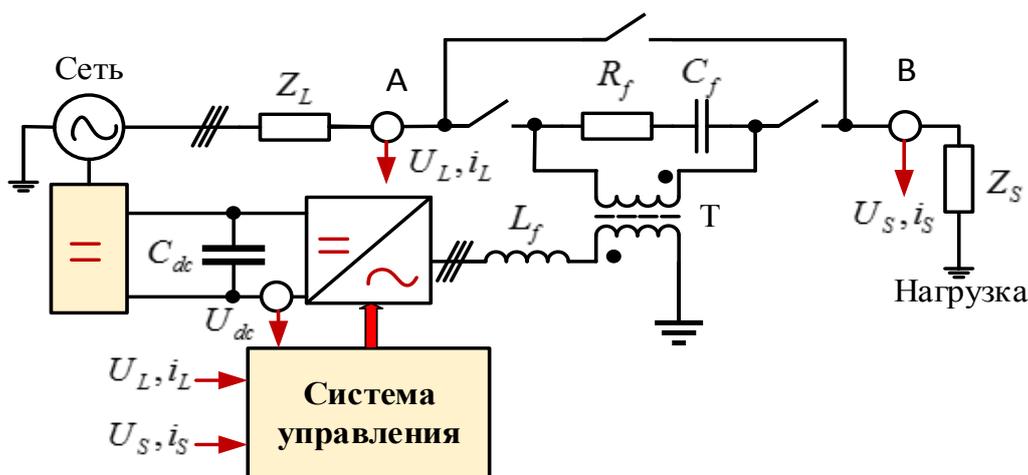


Рис. 9. Структурная схема устройства динамического восстановления напряжения DVR

Накопителем энергии является конденсатор, заряжаемый от сети через выпрямитель. Фильтр низких частот для простоты реализации целесообразно выполнить в виде индуктивности в цепи инвертора и RC-цепи в первичной или вторичной обмотке инжекторного трансформатора. Особой разницы между нахождением RC-цепи в первичной или вторичной обмотке трансформатора нет, поэтому примем, что эти элементы включены во вторичную обмотку трансформатора (рис. 9). Сопротивление участка линии до включения DVR обозначено Z_L , а сопротивление нагрузки – Z_S .

Наиболее часто встречающимися нарушениями качества электроэнергии являются провалы и повышения напряжения [9, 12, 13]. Провал напряжения определяется во всех отечественных и мировых стандартах [2, 6, 7] как временное снижение среднеквадратичного напряжения в диапазоне от 10 до 90% от номинального напряжения длительностью от половины цикла до одной минуты, то есть он характеризуется внезапным снижением текущего значения напряжения в диапазоне 0,1–0,9 от номинального с последующим восстановлением напряжения через короткий промежуток времени. В соответствии с указанными стандартами нормальный провал напряжения длится от 5 мс до 1 минуты.

Провалы напряжения возникают в основном при запуске мощных нагрузок (асинхронных двигателей, сварочных агрегатов и др.) в параллельных ветвях распределительной системы или при различных неисправностях в ней. В стандартах качества электроэнергии [2, 6, 7] повышение напряжения определяется как увеличение среднеквадратичного (действующего) значения напряжения питания на 1,1–1,8 от номинального на время от половины цикла до 1 минуты. Выбросы напряжения в основном свя-

заны с переключением больших конденсаторов или отключением тяжелых нагрузок. Выбросы напряжения менее распространены в сельских электрических сетях, поэтому они не так важны, как провалы напряжения.

Эффективность устройства динамического восстановления напряжения определяется прежде всего эффективностью его системы управления, обеспечивающей приемлемую компенсацию основных нарушений качества электрической энергии. Наиболее сложной задачей является диагностика нарушений качества электрической энергии и связанная с этим синхронизация вырабатываемого инвертором напряжения. Известно достаточно много алгоритмов диагностики напряжения сети: от самых простых (по действующему напряжению) до сложных систем, реализуемых на основе нейронных сетей [7, 9, 10].

Среди всех этих алгоритмов наибольший интерес для использования в сельских электрических сетях 0,4 кВ представляет достаточно простой метод, основанный на использовании представления пространственного вектора трехфазного напряжения сети \vec{U}_L в виде разложения на ортогональные, вращающиеся с синхронной частотой оси – d и q (рис. 10, а) [10]. Преобразование трехфазного напряжения сети к двухфазной системе происходит следующим образом.

Матрицу идеального фазного напряжения сети можно представить в виде

$$[U_L] = \begin{bmatrix} U_{AL} \\ U_{BL} \\ U_{CL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{mA} \sin \theta \\ U_{mB} \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ U_{mC} \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где U_{AL}, U_{BL}, U_{CL} – мгновенные значения фазных напряжений сети, В;

U_{mA}, U_{mB}, U_{mC} – амплитуды фазных напряжений, В;

$\theta = \omega t$ – мгновенное значение угла поворота пространственного вектора напряжения, рад.;

$\omega = 2\pi f$ – угловая частота фазного напряжения;

f – линейная частота сети фазного напряжения, Гц.

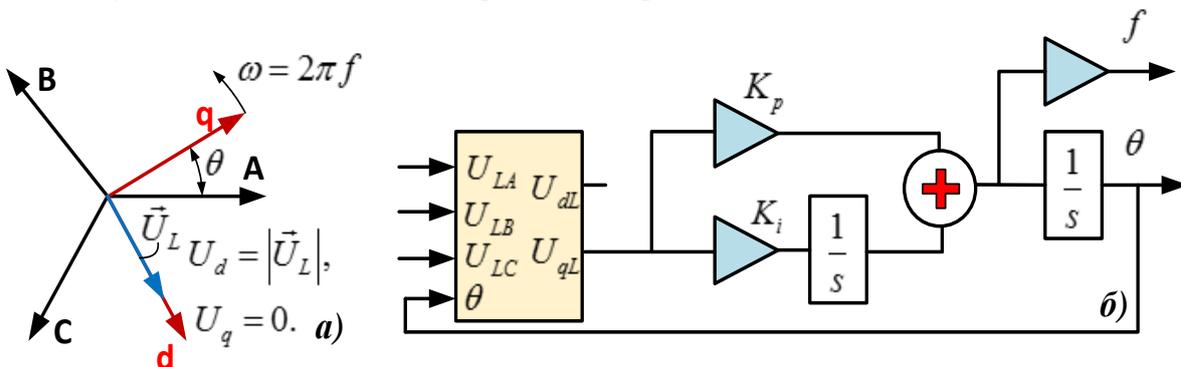


Рис. 10. Синхронная система координат напряжения (а) и функциональная схема блока фазовой автоподстройки частоты (б)

Матрица проекций пространственного вектора напряжения на систему синхронных вращающихся координат имеет вид

$$\begin{bmatrix} U_{dL} \\ U_{qL} \\ U_{0L} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{AL} \\ U_{BL} \\ U_{CL} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где U_{dL}, U_{qL}, U_{0L} – составляющие напряжения по осям d, q и напряжение нулевой последовательности, В.

Обратное преобразование из системы координат dq выполняется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} U_{AL} \\ U_{BL} \\ U_{CL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta & 1 \\ \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dL} \\ U_{qL} \\ U_{0L} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

В вариантах при идеальном симметричном трехфазном напряжении, когда $U_{mA} = U_{mB} = U_{mC} = U_m$, напряжения во вращающейся системе координат имеют следующие значения:

$$U_{dL} = U_m; U_{qL} = 0; U_{0L} = 0. \quad (5)$$

Для диагностики нарушения напряжения сети и синхронизации с мгновенным углом поворота вектора напряжения сети используется блок автоматической подстройки частоты (блок ФАПЧ) [8, 10], функциональная схема которого приведена на рисунке 10, б. Данный блок представляет собой замкнутую систему автоматического управления, где с помощью пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора подбирается угол θ таким образом, чтобы обеспечивалось равенство нулю напряжения U_{qL} .

Структурная схема системы автоматического управления устройством динамического восстановления напряжения представлена на рисунке 11.

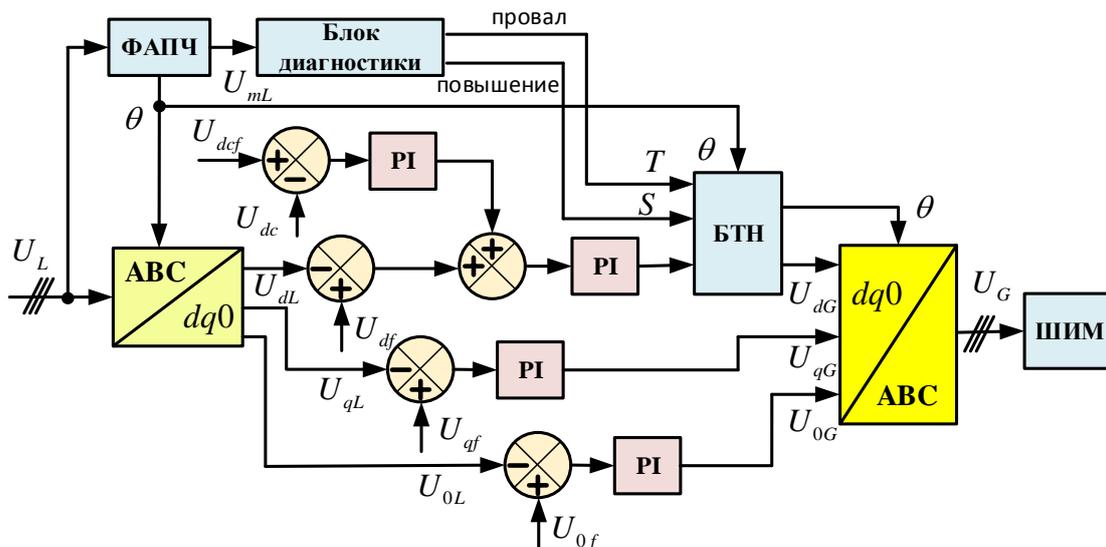


Рис. 11. Структурная схема системы автоматического управления устройством динамического восстановления напряжения

Диагностика нарушения качества напряжения осуществляется путем сравнения вычисленной блоком ФАПЧ длины вектора напряжения $U_{mL} = \sqrt{U_{dL}^2 + U_{qL}^2}$ с заданным диапазоном допустимого значения и выдачей логических сигналов о появлении провала или повышения напряжения сети питания. Согласно этим сигналам DVR переходит в активный режим работы.

Компенсация нарушений качества напряжения осуществляется тремя пропорционально-интегральными регуляторами, которые формируют компенсирующее напряжение инвертора таким образом, чтобы обеспечивалось стандартное напряжение питания (5), задаваемое соответствующими значениями U_{df}, U_{qf}, U_{0f} регуляторов.

Поскольку источником энергии для инвертора является конденсатор, то при активной работе инвертора происходит его разряд, в результате чего напряжение сети постоянного тока U_{dc} уменьшается. Для учета и компенсации этого эффекта используется дополнительный четвертый контур регулирования со своим регулятором.

В случае появления повышения напряжения DVR должен также его компенсировать, для чего напряжение инвертора должно иметь сдвиг по фазе в 180° и положительное значение U_d , компенсирующее это повышение. Для данных целей в системе управления предусмотрен блок БТН, выполняющий эти операции.

Для оценки эффективности восстановления напряжения в программном комплексе SimInTech [5] разработана компьютерная модель DVR согласно схеме рисунка 11. Данная модель показана на рисунке 12.

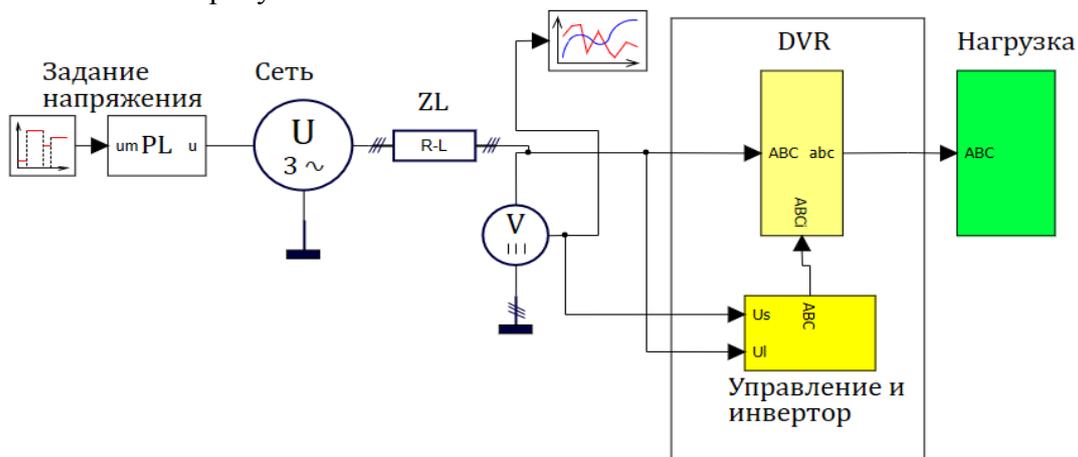


Рис. 12. Компьютерная модель системы динамического восстановления напряжения

Параметры модели:

- нагрузка трехфазная симметричная, мощность 3 кВт, $\cos \varphi = 0,8$;
- индукторные трансформаторы (мощность 5 кВА при коэффициенте трансформации – 1);
- накопительный конденсатор $C_{dc} = 10000$ мкФ;
- $Z_L = 0,2 + j0,001$;
- $L_f = 0,8$ мГн;
- $R_f = 0,65$ Ом;
- $C_f = 85$ мкФ.

На рисунке 13, а показаны кривые изменения мгновенного фазного напряжения питания, где моделируется провал и повышение амплитуды напряжения длительностью по 0,08 с, а на рисунке 13, б – кривые фазных напряжений нагрузки.

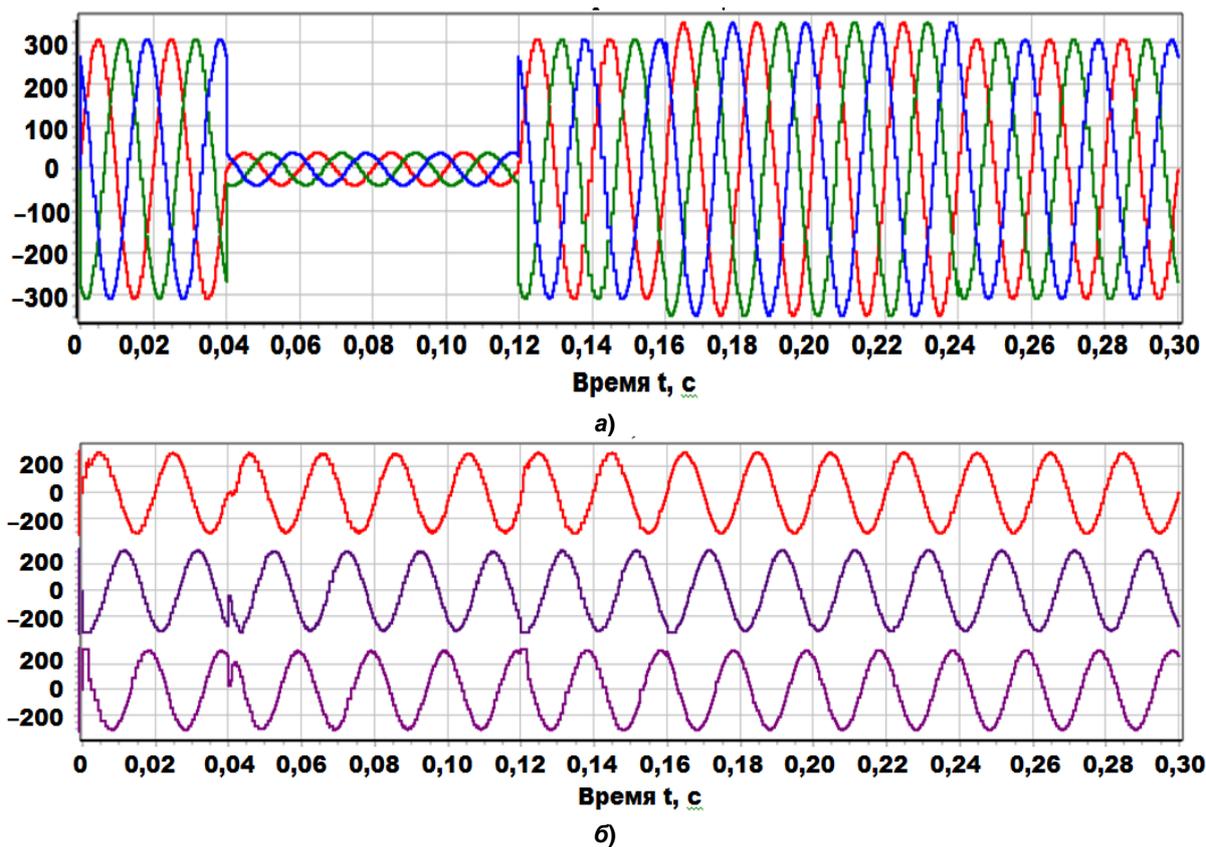


Рис. 13. Кривые мгновенного фазного напряжения сети (а) и мгновенного фазного напряжения нагрузки (б)

Нетрудно заметить, что за исключением переходного процесса при включении инвертора кривые фазных напряжений нагрузки сохраняют свою амплитуду и форму при всех моделируемых нарушениях качества электроэнергии.

Выводы

1. В сельских электрических сетях 0,4 кВ достаточно часто наблюдаются кратковременные нарушения качества электроэнергии, такие как прерывание подачи напряжения, провалы и повышения напряжения, искажения формы напряжения и др., что обусловлено самой структурой системы сельского электроснабжения, когда самые разнообразные нагрузки включаются параллельно друг другу к вторичной обмотке трансформатора. Для компенсации указанных нарушений качества электроэнергии предложено использовать устройства динамического восстановления напряжения.

2. Для сельских электрических сетей 0,4 кВ целесообразно использовать устройство динамического восстановления напряжения, содержащее инжекторный трансформатор, вторичная обмотка которого включена последовательно с нагрузкой, преобразователь постоянного напряжения в переменное, фильтр высших гармоник, накопитель энергии и систему управления. Накопителем энергии является конденсатор, заряжаемый от сети через выпрямитель. Фильтр низких частот для простоты реализации целесообразно выполнить в виде индуктивности в цепи инвертора и RC-цепи в первичной или вторичной обмотке инжекторного трансформатора.

3. Предложенная система автоматического управления устройством динамического восстановления напряжения включает блок автоматической подстройки частоты, осуществляющий диагностику нарушения напряжения сети, а компенсация нарушений качества напряжения осуществляется тремя пропорционально-интегральными регуля-

торами, которые формируют компенсирующее напряжение инвертора таким образом, чтобы обеспечивалось стандартное напряжение питания. Принцип управления базируется на методе, предполагающем использование представления пространственного вектора трехфазного напряжения сети в виде разложения на ортогональные оси, вращающиеся с ее синхронной частотой.

4. Разработанная в программном комплексе SimInTech компьютерная модель устройства динамического восстановления напряжения позволяет проводить оценку эффективности восстановления напряжения при различных нарушениях качества электроэнергии, что необходимо при обосновании структуры и параметров устройства динамического восстановления напряжения.

Список источников

1. Афоничев Д.Н., Пиляев С.Н., Васильев В.В. Возможности использования устройств динамического восстановления напряжения в сельских электрических сетях // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы международной научно-практической конференции (Воронеж, 30 ноября 2023 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. С. 273–284.
2. ГОСТ 32144-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, NEQ). Москва: Стандартинформ, 2014. 17 с.
3. Карташев И.И., Тульский В.Н., Шамонов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии: учебное пособие. Москва: Издательский дом МЭИ, 2017. 347 с.
4. Пиляев С.Н., Пиляев В.С., Афоничева Д.Д. Моделирование пространственного вектора напряжения электрических машин переменного тока // Моделирование информационных систем и технологий: материалы международной научно-практической конференции (Воронеж, 27 октября 2022 г.). Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, 2022. С. 384–395. DOI: 10.58168/MIST2022_384-395.
5. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. URL: <http://help.simintech.ru> (дата обращения: 11.07.2024).
6. Bollen M.H.J. Understanding power quality problems. Voltage Sags and Interruptions. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2000. 551 p.
7. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Power quality in power systems, electrical machines and power-electronic drives. London: Academic Press (is an imprint of Elsevier), 2023. 1284 p.
8. Luo F.L., Ye H. Electronics. Advanced Conversion Technologies. 2nd edition. USA, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group, 2018. 706 p.
9. Moghassemi A., Padmanaban S. Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies. Power Converters. Control Methods and Modified Configurations // Energies. 2020. Vol. 13(16). P. 4152. DOI: 10.3390/en13164152.
10. Power Electronics Handbook; edited by Muhammad H. Rashid. London: Butterworth-Heinemann (is an imprint of Elsevier), 2024. 1472 p.
11. Power quality in modern power systems; edited by P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, Jens Bo Holm-Nielsen, P. Sivaraman. London: Academic Press (is an imprint of Elsevier), 2021. 366 p.
12. Shengwen Li, Chang X., Wang H. et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Integrated Energy Optimal Compensation // Electronics. 2023. Vol. 12(3). P. 531. DOI: 10.3390/electronics12030531.
13. Soomro A.H., Larik A.S., Mahar M.A. et al. Dynamic Voltage Restorer – A comprehensive review // Energy Reports. 2021. Vol. 7. Pp. 6786–6805. DOI: 10.1016/j.egy.2021.09.004.

References

1. Afonichev D.N., Pilyaev S.N., Vasiliev V.V. Possibilities of using dynamic voltage recovery devices in rural electric networks. In: Science and education at the present stage of development: experience, problems and solutions for agriculture: Proceeding of the International Research-to-Practice Conference (Voronezh, November 30, 2023). Voronezh: Voronezh State Agrarian University Publishers; 2023:273-284. (In Russ.).
2. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. (EN 50160:2010, NEQ). Moscow: Standartinform Publishers; 2014. 17 p. (In Russ.).
3. Kartashev I.I., Tulsy V.N., Shamonov R.G. et al. Electricity quality management: textbook. Moscow: Moscow Power Engineering Institute Publishers; 2017. 347 p. (In Russ.).
4. Pilyaev S.N., Pilyaev V.S., Afonicheva D.D. Modeling of the spatial voltage vector of alternating current electric machines. In: Modeling of information systems and technologies: Proceedings of the International Research-to-Practice Conference (Voronezh, October 27, 2022). Voronezh: Voronezh State Forestry University named after G.F. Morozov Publishers; 2022:384-395. DOI: 10.58168/MIST2022_384-395. (In Russ.).
5. SimInTech Information & Reference System. URL: <http://help.simintech.ru>. (In Russ.).
6. Bollen M.H.J. Understanding power quality problems. Voltage Sags and Interruptions. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2000. 551 p.
7. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Power quality in power systems, electrical machines and power-electronic drives. London: Academic Press (is an imprint of Elsevier); 2023. 1284 p. (In Russ.).
8. Luo F.L., Ye H. Electronics. Advanced Conversion Technologies. 2nd edition. USA, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group; 2018. 706 p. (In Russ.).
9. Moghassemi A., Padmanaban S. Voltage Restorer (DVR): A Comprehensive Review of Topologies. Power Converters. Control Methods and Modified Configurations. *Energies*. 2020;13(16):4152. DOI: 10.3390/en13164152. (In Russ.).
10. Power Electronics Handbook; edited by Muhammad H. Rashid. London: Butterworth-Heinemann (is an imprint of Elsevier); 2024. 1472 p.
11. Power quality in modern power systems; edited by P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, Jens Bo Holm-Nielsen, P. Sivaraman. London: Academic Press (is an imprint of Elsevier); 2021. 366 p.
12. Shengwen Li, Chang X., Wang H. et al. Dynamic Voltage Restorer Based on Integrated Energy Optimal Compensation. *Electronics*. 2023;12(3):531. DOI: 10.3390/electronics12030531.
13. Soomro A.H., Larik A.S., Mahar M.A. et al. Dynamic Voltage Restorer – A comprehensive review. *Energy Reports*. 2021;7:6786-6805. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.09.004.

Информация об авторах

Д.Н. Афоничев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dmafionichev@yandex.ru.

С.Н. Пилияев – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», pilyaevs@mail.ru.

В.В. Васильев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», vasiliev.Vladimir87@mail.ru.

Information about the authors

D.N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dmafionichev@yandex.ru.

S.N. Pilyaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, pilyaevs@mail.ru.

V.V. Vasiliev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Engineering and Automation Voronezh, State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, vasiliev.vladimir87@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.07.2024; одобрена после рецензирования 08.09.2024; принята к публикации 15.09.2024.

The article was submitted 20.07.2024; approved after reviewing 08.09.2024; accepted for publication 15.09.2024.

© Афоничев Д.Н., Пилияев С.Н., Васильев В.В., 2024