УДК 621.316.72

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГЕБРЫ КВАТЕРНИОНОВ ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ КАСКАДНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

QUATERNION ALGEBRA APPLICATION FOR LINE VOLTAGE SYMMETRIZATION OF CASCADED MULTILEVEL INVERTER IN EMERGENCY OPERATING MODES

Сидоров Георгий Сергеевич
аспирант кафедры проектирования технологических машин,
Новосибирский государственный технический университет;
младший научный сотрудник
Центра технологического превосходства
geopgiy@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается задача обеспечения отказоустойчивости высоковольтного частотно-регулируемого электропривода на базе каскадного включения Н-мостов. Отказ силовых ячеек приводит к асимметрии выходных напряжений, что критично для непрерывных технологических процессов нефтегазового сектора. В качестве эффективного решения повышения отказоустойчивости используется алгоритм управляемого смещения нейтральной точки, позволяющий сохранить симметрию линейных напряжений при различном количестве активных ячеек в фазах. В работе представлен вывод обратной матрицы координатных преобразований, адаптированной для произвольных комбинаций неисправных модулей. Новизна подхода заключается в использовании аппарата кватернионов для описания координатных преобразований в гиперкомплексном пространстве, что обеспечивает компактную аналитическую форму и вычислительную устойчивость. Представленные результаты ориентированы на прямую реализацию в системах управления реального времени высоковольтных преобразователей частоты.

Ключевые слова: многоуровневый каскадный инвертор, высоковольтный электропривод, отказоустойчивость, симметрирование линейных напряжений, управляемое смещение нейтрали, аварийный режим работы, гиперкомплексное пространство, алгебра кватернионов, метод Грама-Шмидта, матрица координатных преобразований.

Sidorov Georgii Sergeevich
Postgraduate Student of the Department
of Technological Machines Design,
Novosibirsk State Technical University;
Junior Research Fellow
Center for Technological Excellence
geopgiy@mail.ru

Annotation. This paper addresses the problem of ensuring fault tolerance in high-voltage variable-frequency electric drives based on cascaded H-bridge multilevel inverters. The failure of power cells leads to asymmetry in the output voltages, which is critical for continuous technological processes in the oil and gas sector. As an effective solution for improving fault tolerance, the controlled neutral shift algorithm is employed, allowing the preservation of line voltage symmetry despite an unequal number of active cells in the phases. The paper presents the derivation of an inverse coordinate transformation matrix, adapted for arbitrary combinations of faulty modules. The novelty of the approach lies in the use of quaternion algebra to describe coordinate transformations in hypercomplex space, which provides a compact analytical form and computational stability. The presented results are intended for direct real-time implementation in control systems of high-voltage frequency converters.

Keywords: multilevel cascaded inverter, medium-voltage drive, fault tolerance, line voltage symmetrization, controlled neutral shift, emergency mode, hypercomplex space, quaternion algebra, Gram-Schmidt process, coordinate transformation matrix.

Введение. В современной индустриальной парадигме электропривод большой мощности выступает фундаментом энергоэффективности и технологической устойчивости производства. Эволюция силовой электроники и микропроцессорных систем автоматизации обеспечила качественный переход от простейших нерегулируемых схем пуска к сложным системам на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП), работающим с асинхронными и синхронными двигателями [1, 2]. Применение алгоритмов векторного управления позволяет прецизионно регулировать момент и поток электрической машины, обеспечивая высокие динамические характеристики и оптимизацию энергопотребления в различных режимах нагрузки [3, 4].

Переход к классам напряжения 6 (10) кВ и выше обусловлен необходимостью питания оборудования мегаваттного класса, широко применяемого для привода магистральных насосов и компрессорных агрегатов [5]. Использование высокого напряжения позволяет значительно снизить рабочие токи, что критически важно для уменьшения сечения кабельных линий и минимизации потерь мощности на передачу электроэнергии. Реализация таких систем стала возможной благодаря внедрению многоуровневых топологий преобразователей частоты (NPC, CHB, MMC), которые позволяют формировать высоковольтное выходное напряжение путем последовательного соединения полупроводниковых компонентов с меньшим номинальным напряжением, одновременно улучшая спектральный состав выходного сигнала [6–10].

Специфика нефтегазового сектора накладывает жесткие требования к надежности и исполнению высоковольтного оборудования. В условиях добычи и переработки первоочередное значение имеет взрывобезопасность: приводное оборудование насосных и компрессорных станций должно соответствовать требованиям Ex-защиты, что часто реализуется через размещение преобразователей в специальных герметизированных помещениях с избыточным давлением для исключения попадания взрывоопасных смесей. Особое внимание уделяется непрерывности технологического процесса: для ответственных механизмов, таких как магистральные нефтенасосы, внедряются функции шунтирования силовых ячеек, позволяющие продолжать работу при частичном отказе преобразователя. Кроме того, ЧРП решают проблему тяжелого пуска центробежных агрегатов под давлением, снижая пусковые токи и динамические нагрузки на вал, что критично для систем с большим моментом инерции. Современные решения требуют глубокой интеграции в АСУ ТП (SCADA) для мониторинга в реальном времени температуры обмоток, вибрации и параметров электромагнитной совместимости.

Текущие тенденции в области высоковольтного привода характеризуются доминированием многоуровневых преобразователей частоты и систем LCI (Load Commutated Inverters) для сверхмощных синхронных машин [12]. Активно внедряются безредукторные (прямые) приводы и рекуперативные преобразователи, обеспечивающие возврат энергии в сеть в тормозных режимах, что в совокупности с минимизацией гармонических искажений тока позволяет существенно снизить износ механических узлов и повысить качество электроэнергии в промышленных сетях.

В современной инженерной практике выделяют несколько ключевых стратегий резервирования, различающихся по сложности аппаратной реализации и алгоритмической нагрузке на систему управления.

Первая группа методов основана на введении структурной избыточности. Традиционным подходом является оперативное замещение дефектного силового модуля резервным элементом, находящимся в состоянии «горячего» ожидания. Это достигается включением в каждое плечо инвертора дополнительных ячеек сверх минимально необходимого количества для обеспечения номинального напряжения [13]. Альтернативой является реализация нагрузочного резервирования [14], при котором система использует вентильный запас и форсирование по напряжению оставшихся в работе модулей. Однако данный метод накладывает жесткие ограничения на проектирование: он требует существенного завышения установленной мощности питающего многообмоточного трансформатора и использования полупроводниковых ключей с более высоким классом по напряжению и току.

Вторая группа методов опирается на программную реконфигурацию и алгоритмы управления. Простейшим решением для сохранения симметрии системы при отсутствии избыточных ячеек является принудительный вывод из работы одинакового количества исправных модулей в каждой фазе [15]. Несмотря на простоту реализации и сохранение фазового сдвига в 120°, этот подход ведет к резкому снижению амплитуды выходного напряжения и неэффективному использованию ресурсов установки. Более совершенным и экономически целесообразным решением признан метод шунтирования отказавшего модуля с применением алгоритма управляемого смещения нейтрали (Neutral Shift) или симметрирования линейных напряжений. Данный подход использует тот факт, что точка звезды инвертора является плавающей; варьируя её потенциал и корректируя углы фазных напряжений удается сформировать симметричную систему линейных напряжений даже при разном количестве активных ячеек в фазах.

Наиболее технологически сложные системы предполагают полную реконфигурацию топологии силового тракта и сопутствующую коррекцию глобального алгоритма широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [3, 11]. В частности, для трехуровневых инверторов NPC перспективным направлением является использование четвертой «резервной» стойки, которая через систему тиристорных ключей и предохранителей подключается взамен поврежденного плеча, обеспечивая продолжение работы на 100 % мощности [11].

Реализация вышеперечисленных стратегий требует интеграции в систему управления (АСУ ТП) продвинутых функций диагностики и модифицированных матриц преобразования координат (например, модифицированной матрицы Э. Кларк [2, 10]) для компенсации возникающих искажений и предотвращения перенапряжения в звене постоянного тока. Это гарантирует непрерывность технологического цикла, что является приоритетом для магистральных насосных и компрессорных станций в нефтегазовом секторе.

В данной статье предлагается рассмотреть вывод матрицы обратного преобразования аналогичной матрице Э. Кларк для алгоритма смещения нейтрали и способ технической реализации на основании алгебры гиперкомплексных чисел.

Описание алгоритма управляемого смещения нейтральной точки. В нормальном режиме работы автономного инвертора напряжения (АИН) фазные векторы сдвинуты друг относительно дру-

га на 120 электрических градусов. Благодаря этому формируется равносторонний треугольник *U*, *V*, *W*. Для 13-уровневого инвертора построенного по топологии каскадного включения Н-мостов длина каждой стороны составляет $6\sqrt{3}$ от амплитуды выходного вектора отдельной стойки, что поясняется на рисунке 1. Целью алгоритма управляемого смещения нейтральной точки является поиск нового положения нейтральной точки выходной системы фазных напряжений при которой достигается симметрия выходных напряжений инвертора. В случае возникновения неисправности, например, при отказе двух силовых модулей в фазе *U*, как показано на рисунке 2, работа двигателя становится асимметричной. Чтобы это устранить, требуется выполнить коррекцию – сместить нейтральную (среднюю) точку на определённый угол в соответствии с рисунком 3.

$$|\boldsymbol{U}_{UV}| = |\boldsymbol{U}_U|^2 + |\boldsymbol{U}_V|^2 - 2|\boldsymbol{U}_U||\boldsymbol{U}_V|\cos\varphi_{uv};$$

$$|\boldsymbol{U}_{WU}| = |\boldsymbol{U}_W|^2 + |\boldsymbol{U}_U|^2 - 2|\boldsymbol{U}_W||\boldsymbol{U}_U|\cos\varphi_{wu};$$

$$|\boldsymbol{U}_{WV}| = |\boldsymbol{U}_W|^2 + |\boldsymbol{U}_V|^2 - 2|\boldsymbol{U}_W||\boldsymbol{U}_V|\cos\varphi_{wv}.$$

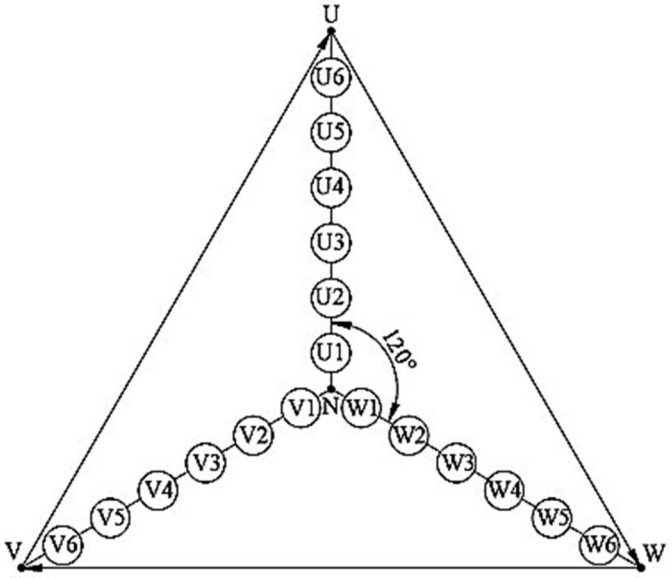

Рисунок 1 – Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений 13-ти уровневого АИН в исправном состоянии

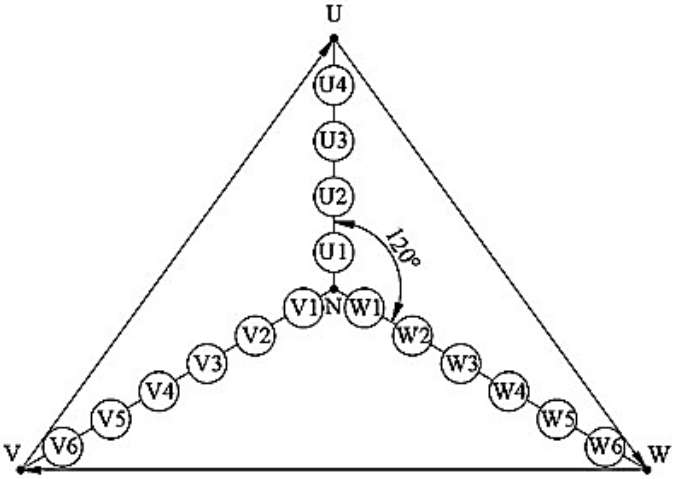

Рисунок 2 – Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений 13-ти уровневого АИН в аварийном режиме работы

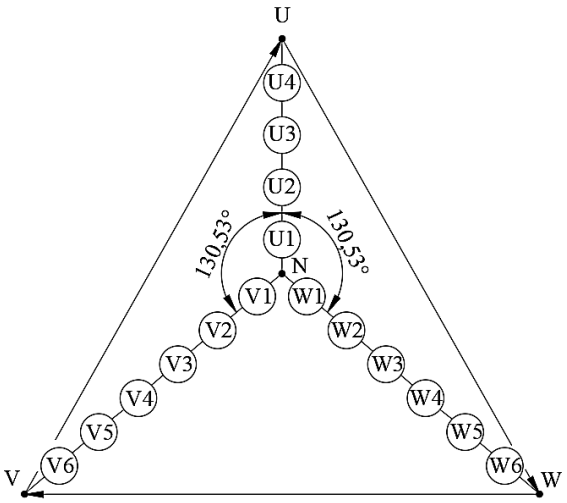

Рисунок 3 – Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений 13-ти уровневого АИН в аварийном режиме работы после смещения нейтрали N

Решение данной задачи симметрирования линейных напряжений рассмотрено во многих работах [2, 16–20]. Предлагается рассмотреть вывод обратной матрицы координатных преобразований, численные значения элементов которой для любого числа комбинаций силовых ячеек в фазе могут быть получены с применением программы для ЭВМ [21].

Координатные преобразования в гиперкомплексном пространстве. На рисунке 4 приведена векторная диаграмма трехфазной системы фазных напряжений U_U, U_V, U_W и двухфазной ортогональной U_α, U_β. Предлагается установить зависимость между данными системами аналогично как предложено в работе [22]. Направление оси *α* выбирается таким образом, чтобы U_α=U_U. На рисунке 4 также обозначено $U_{\alpha V}$, $U_{\alpha W}$ – проекции U_α на оси *V* и *W* соответственно; $U_{\beta V}$, $U_{\beta W}$ проекции U_β на оси *V* и *W* соответственно. Тогда может быть записана система уравнений (1) определяющая зависимость между трехфазной и двухфазной системами.

$$\begin{cases} \mathbf{U}_U = \mathbf{U}_\alpha; \\ \mathbf{U}_V = \mathbf{U}_{\beta V} + \mathbf{U}_{\alpha V}; \\ \mathbf{U}_W = \mathbf{U}_{\beta W} + \mathbf{U}_{\alpha W}. \end{cases} \quad (1)$$

Затем систему (1) можно преобразовать в скалярную форму (2) для составления матрицы координатного преобразования.

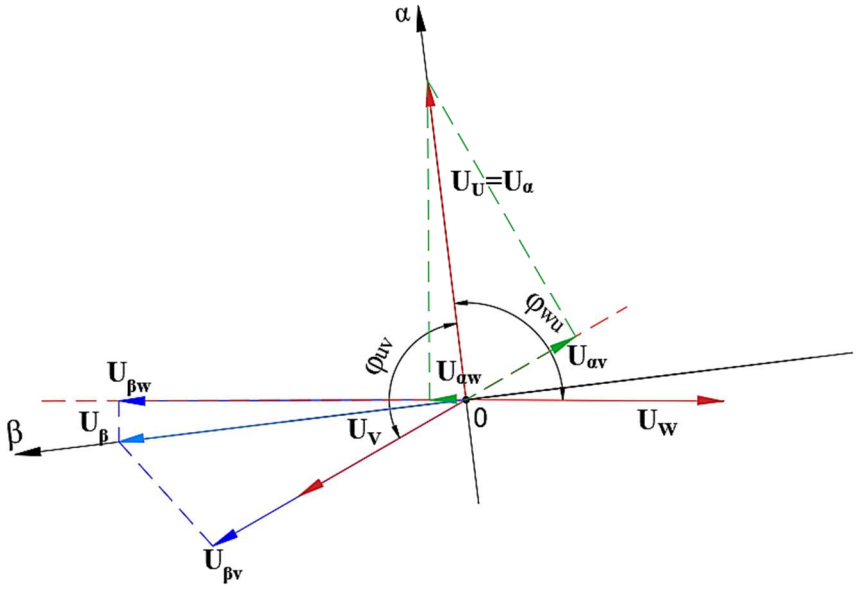

Рисунок 4 – Пояснение к выполнению обратного преобразования Из ортогональной системы α, β в трехфазную систему *U*, *V*, *W*

$$\begin{cases} U_U = U_\alpha; \\ U_V = -U_\alpha \cos(\pi - \varphi_{uv}) + U_\beta \cdot \cos(\varphi_{uv} - \frac{\pi}{2}); \\ \vec{U}'_W = -U_\alpha \cos(\pi - \varphi_{wu}) - U_\beta \cdot \cos(\varphi_{wu} - \frac{\pi}{2}). \end{cases} \quad (2)$$

После преобразования системы (2) можно получить систему (3) и затем представить в векторно-матричной форме (4).

$$\begin{cases} U_U = U_\alpha; \\ U_V = U_\alpha \cos(\varphi_{uv}) + U_\beta \cdot \sin(\varphi_{uv}); \\ U_W = U_\alpha \cos(\varphi_{wu}) - U_\beta \cdot \sin(\varphi_{wu}). \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{U}_{\boldsymbol{UVW}} = \mathbf{L} \times \mathbf{U}_{\alpha\beta}, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{U}_{\boldsymbol{UVW}} = \begin{pmatrix} U_U \\ U_V \\ U_W \end{pmatrix}; \mathbf{U}_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{pmatrix}; \mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \cos(\varphi_{uv}) & \sin(\varphi_{uv}) \\ cos(\varphi_{wu}) & -\sin(\varphi_{wu}) \end{pmatrix}.$$

В общем случае при наличии нулевой последовательности в трехфазных напряжениях матрица L может быть записана в виде (5):

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \cos(\varphi_{uv}) & \sin(\varphi_{uv}) & 1 \\ cos(\varphi_{wu}) & -\sin(\varphi_{wu}) & 1 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для описания координатных преобразований в гиперкомплексном пространстве удобно использовать аппарат кватернионов. Кватернион можно рассматривать как обобщение комплексных чисел на случай четырёхмерного гиперкомплексного пространства, и его принято записывать следующим образом [23]:

$$\mathbf{\Lambda} = \lambda_0 + \lambda_1 \mathbf{q}_1 + \lambda_2 \mathbf{q}_2 + \lambda_3 \mathbf{q}_3,$$

где $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – вещественные коэффициенты; q_1, q_2, q_3 – мнимые единицы [24].

Аналогично положениям, изложенным в работах [23, 24], можно получить уравнения для вычисления вещественных коэффициентов (6–9):

$$\lambda_0 = \pm \left| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right| \frac{\sqrt{tr\mathbf{L} + 1}}{2}; \quad (6)$$

$$\lambda_1 = \pm \left\| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right\| \frac{a_{32} - a_{23}}{4\lambda_0} = \pm \left| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right| \frac{a_{32} - a_{23}}{2\sqrt{tr\mathbf{L} + 1}}; \quad (7)$$

$$\lambda_2 = \pm \left\| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right\| \frac{a_{13} - a_{31}}{4\lambda_0} = \pm \left| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right| \frac{a_{13} - a_{31}}{2\sqrt{tr\mathbf{L} + 1}}; \quad (8)$$

$$\lambda_3 = \pm \left\| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right\| \frac{a_{21} - a_{12}}{4\lambda_0} = \pm \left| \mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0} \right| \frac{a_{21} - a_{12}}{2\sqrt{tr\mathbf{L} + 1}}, \quad (9)$$

где $a_{11} \ldots a_{33}$ – элементы матрицы *L*, *trL* – след матрицы L, $\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0}$ – кватернион преобразования трехмерной системы координат *α*, *β*, 0, в A, B, C.

Мнимые единицы q_1, q_2, q_3, характеризуются единичной нормой и образуют правую тройку взаимно перпендикулярных векторов [23]. Благодаря этому описанная процедура представления элементов матрицы L в гиперкомплексном пространстве справедлива только в случае ортогонального преобразования. Нетрудно получить координаты базисных векторов из столбцов (5):

$$\mathbf{e}_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos(\varphi_{uv}) \\ cos(\varphi_{wu}) \end{pmatrix}; \ \mathbf{e}_2 = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \sin(\varphi_{uv}) \\ -\sin(\varphi_{wu}) \end{pmatrix}; \ \mathbf{e}_3 = \begin{pmatrix} a_{13} \\ a_{23} \\ a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Так как полученные базисные векторы не ортонормированы, приведем их к ортонормированному виду методом Грама-Шмидта [25], совместив первый из них с e_1, т.е.:

$$\mathbf{e}_1^* = \mathbf{e}_1 = \begin{pmatrix} a_{11}^* & a_{21}^* & a_{31}^* \end{pmatrix}^T.$$

В свою очередь координаты $\mathbf{e}_2^*$ и $\mathbf{e}_3^*$ находятся как:

$$\mathbf{e}_2^* = \begin{pmatrix} a_{12}^* & a_{22}^* & a_{32}^* \end{pmatrix}^T = \mathbf{e}_2 + \alpha \mathbf{e}_1^*;$$

$$\mathbf{e}_3^* = \begin{pmatrix} a_{13}^* & a_{23}^* & a_{33}^* \end{pmatrix}^T = \mathbf{e}_3 + \alpha_1 \mathbf{e}_1^* + \alpha_2 \mathbf{e}_2^*,$$

где α, α_1, α_2 – вещественные коэффициенты, определяемые из требования ортогональности базисных векторов, которое в матричной форме записи имеет следующий вид [24]:

$$\mathbf{e}_i^T \mathbf{e}_j^* = \left(\mathbf{e}_j^*\right)^T \mathbf{e}_i^* = 0.$$

На основании чего данные параметры вычисляются по следующей формуле [26]:

$$\alpha_{k-1} = -\left\|\mathbf{e}_{k-1}^*\right\|^{-2} \mathbf{e}_k^T \mathbf{e}_{k-1}^*.$$

Откуда:

$$\alpha = -\left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-2} \mathbf{e}_2^T \mathbf{e}_1^* = -\left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-2} (a_{12}a_{11} + a_{22}a_{21} + a_{32}a_{31});$$

$$\alpha_1 = -\left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-2} \mathbf{e}_3^T \mathbf{e}_1^* = -\left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-2} (a_{13}a_{11} + a_{23}a_{21} + a_{33}a_{31});$$

$$\alpha_2 = -\left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-2} \mathbf{e}_3^T \mathbf{e}_2^* = -\left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-2} (a_{13}a_{12} + a_{23}a_{22} + a_{33}a_{32}).$$

На завершающем этапе осуществляется нормировка полученных векторов $\mathbf{e}_1^*$, $\mathbf{e}_2^*$, $\mathbf{e}_3^*$. Для этого каждый элемент соответствующего столбца делится на его евклидову норму, что в итоге позволяет записать:

$$\mathbf{L}^* = \begin{pmatrix} \left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-1} a_{11}^* & \left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-1} a_{12}^* & \left\|\mathbf{e}_3^*\right\|^{-1} a_{13}^* \\ \left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-1} a_{21}^* & \left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-1} a_{22}^* & \left\|\mathbf{e}_3^*\right\|^{-1} a_{23}^* \\ \left\|\mathbf{e}_1^*\right\|^{-1} a_{31}^* & \left\|\mathbf{e}_2^*\right\|^{-1} a_{32}^* & \left\|\mathbf{e}_3^*\right\|^{-1} a_{33}^* \end{pmatrix}.$$

В результате чего становится справедливым равенство:

$$\det \mathbf{L}^* = \pm 1;\ \left(\mathbf{L}^*\right)^{-1} = \left(\mathbf{L}^*\right)^T.$$

Подставляя найденные элементы матрицы $\mathbf{L}^*$ в соотношения (6–9) и принимая во внимание, что $\left|\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0}\right| = \left\|\mathbf{\Lambda}_{\alpha\beta 0}\right\| = 1$, получим вещественные коэффициенты кватерниона преобразования к фазным переменным. Для рассматриваемого состояния силовых модулей 13-уровневого АИН, характеризующегося углами $\varphi_{uv} = \varphi_{wu} = 130.52°$ равны:

$$\lambda_0 = 0.8606;\ \lambda_1 = -0.3566;\ \lambda_2 = 0.3354;\ \lambda_3 = -0.1389.$$

Заключение. Алгоритм управляемого смещения нейтрали является предпочтительным способом сохранения работоспособности привода при асимметрии фаз. Он позволяет использовать полное напряжение оставшихся исправными ячеек без необходимости иметь «горячий» резерв в каждом плече, что значительно повышает коэффициент использования установленной мощности.

В работе предложена методика построения матрицы обратного координатного преобразования, адаптированная для любой комбинации силовых ячеек. Для данной прикладной задачи продемонстрирована эффективность перехода к гиперкомплексному пространству. Кватернионная форма описания преобразований координат обладает большей вычислительной устойчивостью и позволяет избежать сингулярностей (особых точек), характерных для некоторых матричных представлений вращений. Полученные выражения для вещественных коэффициентов кватерниона задают закон, по которому система управления должна изменять фазные напряжения для формирования симметричной системы линейных напряжений.

Представленный вывод формул и алгоритм их вычисления ориентированы на прямую цифровую реализацию в микроконтроллерах и цифровых сигнальных процессорах систем управления современными высоковольтными преобразователями частоты. Это позволяет в режиме реального времени реконфигурировать систему управления сразу после диагностирования факта и места отказа.

Таким образом, предложенный подход, сочетающий методы линейной алгебры и аппарат гиперкомплексных чисел, обеспечивает теоретическую базу для создания высоконадежных и отказоустойчивых систем электропривода, критически важных для непрерывных производств.

Список литературы:

1. Leon J.I. Multilevel Converters: Control and Modulation Techniques for Their Operation and Industrial Applications / J.I. Leon, S. Vazquez, L.G. Franquelo // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105. – № 11. – P. 2066–2081. – DOI: 10.1109/JPROC.2017.2726583
2. Сидоров Г.С. Управление многоуровневыми преобразователями частоты на базе каскадного включения Н-мостов в аварийных режимах работы высоковольтного электропривода / Г.С. Сидоров; Научный руков. О.В. Нос // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии : материалы Всероссийской научно-практической конференции, Кемерово, 22–24 октября 2025 г. – Кемерово : Издательство КузГТУ, 2025. – С. 483–487.
3. Sivapriya A. An Extensive Review on Fault Detection and Fault-tolerant Control of Multilevel Inverter with Applications / A. Sivapriya, N. Kalaiarasi // International Journal of Renewable Energy Research. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 30–43. – DOI: 10.20508/ijrer.v12i1.12721.g8392
4. Comparison of Symmetrical and Asymmetrical Three-Phase H-Bridge Multilevel Inverter for DTC Induction Motor Drives / F. Khoucha [et al.] // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2011. – Vol. 26. – № 1. – P. 64–72. – DOI: 10.1109/TEC.2010.2077296
5. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters / M. Malinowski [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57. – № 7. – P. 2197–2206. – DOI: 10.1109/TIE.2009.2030767
6. A Multilevel Inverter Scheme With Dodecagonal Voltage Space Vectors Based on Flying Capacitor Topology for Induction Motor Drives / J. Mathew [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28. – № 1. – P. 516–525. – DOI: 10.1109/TPEL.2012.2198248
7. Escalante M.F. Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor drive applications / M.F. Escalante, J.-C. Vannier, A. Arzande // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49. – № 4. – P. 809–815. – DOI: 10.1109/TIE.2002.801241
8. High Power Synchronous Machine fed by a Cascaded Regenerative Inverter / J.R. Rodriguez [et al.] // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Edmonton, Alberta, Canada, 5–9 October 2008. – IEEE, 2008. – P. 1–7. – DOI: 10.1109/08IAS.2008.190
9. Design of Active Fault-Tolerant Control System for Multilevel Inverters to Achieve Greater Reliability With Improved Power Quality / Z.A. Alqarni [et al.] // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 77791–77801. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3192283

10. Nos O.V. The Control Technique for Cascaded H-Bridge Multilevel Converter with Faulty Cells / O.V. Nos, E.E. Abramushkina // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia, 29 June – 3 July 2018. – IEEE, 2018. – P. 6403–6406. – DOI: 10.1109/EDM.2018.8434975

11. Lakhdari M. A new structural reconfiguration for multilevel inverters with fault tolerance capability / M. Lakhdari, B. Rabhi, A. Benaissa // Acta Polytechnica. – 2024. – Vol. 64. – № 4. – P. 379–384. – DOI: 10.14311/AP.2024.64.0379

12. Load Commutated Inverter Modeling: Impacts and Solutions for an Isolated Power System / A. Mohammad [et al.] // 2023 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), New Orleans, LA, USA, 11–14 September 2023. – IEEE, 2023. – P. 345–351. – DOI: 10.1109/PCIC43643.2023.10414312

13. Wu B. High-power converters and AC drives / B. Wu, M. Narimani. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2017. – 496 p. – (IEEE Press Series on Power Engineering). ISBN 978-1-119-15606-2

14. Патент № 2289191 Российская Федерация, МПК H02M 5/42, H02P 7/36. Устройство для управления преобразователем частоты с многоуровневым инвертором напряжения и способ управления таким преобразователем: № 2004137568/09: заявл. 21.12.2004: опубл. 20.12.2006 / В.В. Суханов, В.Г. Кашкаров, В.Н. Краснов; заявитель ООО «ПРИВОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ». – Бюл. № 35. – 10 с.

15. Operation of a Medium-Voltage Drive Under Faulty Conditions / J. Rodríguez [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 52. – № 4. – P. 1080–1085. – DOI: 10.1109/TIE.2005.851645

16. Нос О.В. Алгоритмы управления многоуровневым инвертором напряжения с каскадным включением Н-мостов в аварийном режиме работы / О.В. Нос, М.А. Дыбко, Н.И. Нос // Электротехника. – 2021. – № 12. – С. 37–47.

17. Lezana P. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition / P. Lezana, G. Ortiz // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56, № 7. – P. 2697–2703. – DOI: 10.1109/TIE.2009.2019771

18. Jeongwoo K. Improved neutral shift method for fault tolerant operation of three phase MLCI / K. Jeongwoo, C. Younghoon // Journal of Power Electronics. – 2020. – Vol. 20. – № 4. – P. 979–989. – DOI: 10.1007/s43236-020-00161-0

19. Operation of a Medium-Voltage Drive Under Faulty Conditions / J. Rodríguez [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 52. – № 4. – P. 1080–1085. – DOI: 10.1109/TIE.2005.851645.

20. Донской Н.В. Симметрирование линейных напряжений при шунтировании силовых ячеек многоуровневого преобразователя частоты / Н.В. Донской, А.Г. Сергеев // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции, Чебоксары, 07 июня 2019 года. – Чебоксары : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2019. – С. 214–217. – EDN VLCVQM

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614056 Российская Федерация. Программа вычисления элементов матрицы координатных преобразований трехфазной системы напряжений из ортогональных составляющих для различных комбинаций неисправных силовых ячеек многоуровневого инвертора: № 2026613158: заявл. 12.02.2026: опубл. 12.02.2026 / Г.С. Сидоров, О.В. Нос; правообладатель ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет». – 1 с.

22. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов; ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.

23. Нос О.В. Методы анализа и синтеза трехфазных систем с активными силовыми фильтрами в гиперкомплексном пространстве : дис. … д-ра техн. наук / Нос Олег Викторович. – Новосибирск, 2015. – 385 с.

24. Nos O.V. Clarke-Park Coordinates Transformation in the Quaternion Domain / O.V. Nos, N.I. Nos // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 10–12 November 2023. – IEEE, 2023. – P. 420–423. – DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347688

25. Канатников А.Н. Линейная алгебра : учебник для вузов / А.Н. Канатников, А.П. Крищенко; Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 336 с.

26. Гельфанд И.М. Лекции по линейной алгебре. – М. : Добросвет : КДУ, 2007. – 320 с.

List of references:

1. Leon J.I. Multilevel Converters: Control and Modulation Techniques for Their Operation and Industrial Applications / J.I. Leon, S. Vazquez, L.G. Franquelo // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105. – № 11. – P. 2066–2081. DOI: 10.1109/JPROC.2017.2726583

2. Sidorov G.S. Control of Multilevel Frequency Converters Based on Cascaded H-Bridges in Emergency Operation Modes of High-Voltage Electric Drives / G.S. Sidorov; scientific supervisor O.V. Nos // Information-Telecommunication Systems and Technologies : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Kemerovo, October 22–24, 2025. – Kemerovo : KuzSTU Publishing House, 2025. – P. 483–487.

3. Sivapriya A. An Extensive Review on Fault Detection and Fault-tolerant Control of Multilevel Inverter with Applications / A. Sivapriya, N. Kalaiarasi // International Journal of Renewable Energy Research. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – P. 30–43. DOI: 10.20508/ijrer.v12i1.12721.g8392

4. Comparison of Symmetrical and Asymmetrical Three-Phase H-Bridge Multilevel Inverter for DTC Induction Motor Drives / F. Khoucha [et al.] // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2011. – Vol. 26. – № 1. – P. 64–72. DOI: 10.1109/TEC.2010.2077296

5. A Survey on Cascaded Multilevel Inverters / M. Malinowski [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol. 57. – № 7. – P. 2197–2206. DOI: 10.1109/TIE.2009.2030767

6. A Multilevel Inverter Scheme With Dodecagonal Voltage Space Vectors Based on Flying Capacitor Topology for Induction Motor Drives / J. Mathew [et al.] // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – Vol. 28. – № 1. – P. 516–525. DOI: 10.1109/TPEL.2012.2198248

7. Escalante M.F. Flying capacitor multilevel inverters and DTC motor drive applications / M.F. Escalante, J.-C. Vannier, A. Arzande // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2002. – Vol. 49. – № 4. – P. 809–815. DOI: 10.1109/TIE.2002.801241

8. High Power Synchronous Machine fed by a Cascaded Regenerative Inverter / J.R. Rodriguez [et al.] // 2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Edmonton, Alberta, Canada, 5–9 October 2008. – IEEE, 2008. – P. 1–7. DOI: 10.1109/08IAS.2008.190

9. Design of Active Fault-Tolerant Control System for Multilevel Inverters to Achieve Greater Reliability With Improved Power Quality / Z.A. Alqarni [et al.] // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 77791–77801. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3192283

10. Nos O.V. The Control Technique for Cascaded H-Bridge Multilevel Converter with Faulty Cells / O.V. Nos, E.E. Abramushkina // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Erlagol, Russia, 29 June – 3 July 2018. – IEEE, 2018. – P. 6403–6406. DOI: 10.1109/EDM.2018.8434975

11. Lakhdari M. A new structural reconfiguration for multilevel inverters with fault tolerance capability / M. Lakhdari, B. Rabhi, A. Benaissa // Acta Polytechnica. – 2024. – Vol. 64. – № 4. – P. 379–384. DOI: 10.14311/AP.2024.64.0379

12. Load Commutated Inverter Modeling: Impacts and Solutions for an Isolated Power System / A. Mohammad [et al.] // 2023 IEEE Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), New Orleans, LA, USA, 11–14 September 2023. – IEEE, 2023. – P. 345–351. DOI: 10.1109/PCIC43643.2023.10414312

13. Wu B. High-power converters and AC drives / B. Wu, M. Narimani. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2017. – 496 p. – (IEEE Press Series on Power Engineering). ISBN 978-1-119-15606-2

14. Patent № 2289191 Russian Federation, IPC H02M 5/42, H02P 7/36. Device for Controlling a Multilevel Voltage Inverter Frequency Converter and Method for Controlling Such a Converter: № 2004137568/09 : appl. December 21, 2004: publ. December 20, 2006 / V.V. Sukhanov, V.G. Kashkarov, V.N. Krasnov; applicant LLC «PRIVODNYE TEKHNOLOGII». – Bull. № 35. – 10 p.

15. Operation of a Medium-Voltage Drive Under Faulty Conditions / J. Rodríguez [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 52. – № 4. – P. 1080–1085. DOI: 10.1109/TIE.2005.851645

16. Nos O.V. Control Algorithms for a Multilevel Voltage Inverter with Cascaded H-Bridges in Emergency Operation / O.V. Nos, M.A. Dybko, N.I. Nos // Elektrotekhnika [Russian Electrical Engineering]. – 2021. – № 12. – P. 37–47.

17. Lezana P. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition / P. Lezana, G. Ortiz // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2009. – Vol. 56. – № 7. – P. 2697–2703. DOI: 10.1109/TIE.2009.2019771

18. Jeongwoo K. Improved neutral shift method for fault tolerant operation of three phase MLCI / K. Jeongwoo, C. Younghoon // Journal of Power Electronics. – 2020. – Vol. 20. – № 4. – P. 979–989. DOI: 10.1007/s43236-020-00161-0

19. Operation of a Medium-Voltage Drive Under Faulty Conditions / J. Rodríguez [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2005. – Vol. 52. – № 4. – P. 1080–1085. DOI: 10.1109/TIE.2005.851645.

20. Donskoy, N.V. Symmetrization of Line Voltages When Shunting Power Cells of a Multilevel Frequency Converter / N.V. Donskoy, A.G. Sergeev // Dynamics of Nonlinear Discrete Electrical and Electronic Systems : Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference, Cheboksary, June 07, 2019. – Cheboksary : Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, 2019. – P. 214–217. EDN VLCVQM.

21. Certificate of State Registration of Computer Program № 2026614056 Russian Federation. Program for Calculating Elements of Coordinate Transformation Matrices of a Three-Phase Voltage System from Orthogonal Components for Various Combinations of Faulty Power Cells of a Multilevel Inverter: № 2026613158: appl. February 12, 2026: publ. February 12, 2026 / G.S. Sidorov, O.V. Nos; copyright holder Novosibirsk State Technical University. – 1 p.

22. Vinogradov A.B. Vector Control of AC Electric Drives / A.B. Vinogradov; Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. – Ivanovo, 2008. – 298 p.

23. Nos O.V. Methods of analysis and synthesis of three-phase systems with active power filters in hypercomplex space : dis. ... for degree of Doctor of Technical Sciences / Nos Oleg Viktorovich. – Novosibirsk, 2015. – 385 p.

24. Nos O.V. Clarke-Park Coordinates Transformation in the Quaternion Domain / O.V. Nos, N.I. Nos // 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russian Federation, 10–12 November 2023. – IEEE, 2023. – P. 420–423. DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347688

25. Kanatnikov A.N. Linear Algebra : textbook for Universities / A.N. Kanatnikov, A.P. Krishchenko; edited by V.S. Zarubin, A.P. Krishchenko. – M. : Bauman Moscow State Technical University Publishing House, 2006. – 336 p.

26. Gelfand I.M. Lectures on Linear Algebra. – M. : Dobrosvet : KDU, 2007. – 320 p.