

Сравнительный анализ методов резервирования в высоковольтных многоуровневых преобразователях частоты на базе каскадного включения H-мостов

О. В. Нос, Г. С. Сидоров✉

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

✉ geopgiy@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются наиболее распространенные топологии силовой части высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты и методы повышения их отказоустойчивости. Выполнен сравнительный анализ влияния отказов силовых ячеек на производительность технологического оборудования. Показано, что конфигурация с каскадным включением H-мостов (ML-SCHB) обладает преимуществами модульности и линейной масштабируемости, что обусловило ее широкое распространение в составе высокомоощных электромеханических систем среднего и высокого класса напряжений. Систематизированы схемотехнические решения и выявлены тенденции развития отечественного и зарубежного рынка высоковольтных преобразователей частоты. Представлены результаты структурного моделирования двух алгоритмов резервирования – шунтирования по уровню и смещения нейтральной точки инвертора. Моделированием подтверждена более высокая эффективность алгоритма смещения нейтрали в сравнении с методом шунтирования по уровню применительно к обеспечению работоспособности электропривода в аварийных режимах. Показано, что при выходе из строя одной силовой ячейки в фазе алгоритм смещения нейтрали позволяет сохранить электромагнитный момент и угловую скорость на номинальном уровне, что недостижимо при использовании шунтирования по уровню. Приведенные подходы могут быть использованы при проектировании отказоустойчивых высоковольтных электроприводов для нефтегазовой, горнодобывающей и энергетической отраслей промышленности.

Ключевые слова: многоуровневый инвертор напряжения, каскадное включение H-мостов, аварийный режим работы, резервирование, алгоритмы управления, смещения нейтрали

Для цитирования: Нос О. В., Сидоров Г. С. Сравнительный анализ методов резервирования в высоковольтных многоуровневых преобразователях частоты на базе каскадного включения H-мостов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 5. С. 81–94. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-81-94.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Review article

Comparative Analysis of Redundancy Methods in Medium-Voltage Multilevel Voltage Frequency Converters Based on Cascaded H-Bridges

O. V. Nos, G. S. Sidorov✉

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

✉ geopgiy@mail.ru

Abstract. This paper examines the most common power circuit topologies of medium-voltage multilevel frequency converters and the methods employed to enhance their fault tolerance. A comparative analysis assesses how failures of individual power cells affect industrial equipment performance. The cascaded H-bridge (ML-SCHB) configuration offers distinct advantages in terms of modularity and linear scalability, explaining its widespread adoption in high-power electromechanical systems operating at medium and high voltage levels. An overview of circuit design solutions reveals current trends in the domestic and international markets for medium-voltage frequency

converters. Structural modeling compares two redundancy strategies: cell-level bypass and inverter neutral point shifting. Simulation results confirm that the neutral shift algorithm outperforms the cell-level bypass method in preserving electric drive functionality under fault conditions. When a single power cell fails in one phase, the neutral shift algorithm enables the drive to maintain rated electromagnetic torque and angular speed – a capability not achievable with cell-level bypass. These approaches can inform the design of fault-tolerant medium-voltage electric drives for applications in the oil and gas, mining, and power generation industries.

Keywords: multi-level voltage inverter, cascaded H-bridges, emergency operation, redundancy, control algorithms, neutral shift

For citation: Nos O. V., Sidorov G. S. Comparative Analysis of Redundancy Methods in Medium-Voltage Multi-level Voltage Frequency Converters Based on Cascaded H-Bridges // *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2026. Vol. 19, no. 5. P. 81–94. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-5-81-94.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Введение. Современные системы автоматизации производственных процессов в различных отраслях отечественной промышленности строятся на основе частотно-регулируемых приводов, которые находят свое применение в особо ответственных технологических объектах, к числу которых можно отнести питательные и циркуляционные насосы АЭС, перекачивающие станции нефте- и газодобывающей отрасли, в том числе подводного исполнения, вентиляционные установки главного проветривания шахт и тоннелей метрополитена, горнодобывающие машины и шахтные лифтовые подъемники, шаровые и стержневые мельницы, краны большой грузоподъемности, гребные винты танкеров и ледоколов и т. д.

В настоящее время наиболее распространены следующие виды силовых схем многоуровневых высоковольтных преобразователей частоты (ВПЧ) (multi-level medium voltage variable frequency drive – MV VFD) [1]–[3]:

1. Многоуровневый инвертор с фиксированной нейтралью (NPC – Neutral point clamped) [4], который в свою очередь, подразделяется:

– на многоуровневый инвертор I-типа с емкостным делителем и фиксирующими диодами;

– многоуровневый инвертор T-типа с емкостным делителем напряжения и парой встречно-включенных транзисторов, позволяющих объединять средние точки звена постоянного тока и стойки инвертора [5];

– многоуровневый инвертор A-типа с емкостным делителем напряжения и активной балансировкой потерь [6]–[8].

2. Многоуровневый инвертор с «плавающими конденсаторами» (FLC – Flying capacitor) [9], [10].

3. Многоуровневый инвертор с каскадным включением H-мостов (SCHB – Series connected H-bridge) [11];

4. Модульный многоуровневый инвертор (MMC – Modular multilevel converter) [12].

Отечественный высоковольтный электропривод получил свое начальное развитие в 1980–90-е гг., а первый зарубежный многоуровневый инвертор NPC-типа был представлен в 1981 г. [4]. Позднее данная базовая топология была доработана до применения в промышленных установках средней и большой мощности для объектов возобновляемой энергетики [13] и электромеханических систем [14], включая тяговый электропривод автомобилей [15], [16].

Конфигурация силовой цепи с плавающими конденсаторами, впервые описанная в 1992 г. [9], широко используется в автономных системах электропитания на базе солнечных панелей [17], ветряных турбин [18], а также в электроприводах [10], [16].

Конфигурация ВПЧ с каскадным включением низковольтных ячеек на базе топологии H-мостов была запатентована в 1975 г. [19] и в 1988 г. применена для управления высокочастотными катушками стабилизации плазмы в ТОКАМАК [11]. Позднее данная топология использовалась в статических синхронных компенсаторах (STATCOM) [20], в составе интеллектуальных систем гибкой передачи электрической энергии переменного тока (FACTS) и в высоковольтных системах передачи постоянного тока (HVDC) [21], а также в электроприводах средней и большой мощности [22].

Из основных преимуществ многоуровневых ВПЧ с каскадным включением H-мостов можно выделить:

1. Увеличенное число уровней выходного напряжения, которое приводит к улучшению его гармонического состава и, как следствие, уменьшению коэффициента нелинейных искажений (КНИ) [3];

2. Увеличенное число уровней выходного напряжения позволяет снизить значение производной по напряжению, что благоприятно сказывается на работе подшипниковых узлов, электромагнитной совместимости и изоляции электрических машин [23], [24].

3. Применение силовых ключей с низким классом напряжения.

4. Простая интеграция в систему автономного электропитания любых возобновляемых источников электрической энергии постоянного и переменного тока.

5. Модульность, позволяющая повысить надежность электромеханических систем [25] при возникновении аварийных ситуаций за счет работы с меньшим количеством ячеек или реконфигурации силовой части [26].

Анализ схемотехнических решений. Сравнительный анализ схемотехнических решений высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты позволяет выявить их характерные особенности. В частности, применительно к топологии ML-SCHB можно отметить изолированность низковольтных источников питания ячеек, модульность конструкции и возможность исключения из силовой цепи аварийных ячеек шунтированием, обеспечивая таким образом работоспособность преобразовательного устройства при некритичных отказах.

Далее выполнено количественное сравнение силовых полупроводниковых приборов для ВПЧ, выполненных по рассматриваемым топологиям. Формулы для подсчета числа силовых элементов топологии приведены в табл. 1, а графическое представление числа компонентов от уровней выходного напряжения изображено на рис. 1.

На основании табл. 1 и рис. 1 можно выделить одно из важных преимуществ ВПЧ с каскадным включением Н-мостов, заключающееся в линейном увеличении числа силовых полупроводниковых модулей в зависимости от требуемого количества уровней в выходном напряжении,

что делает возможным относительно дешевое масштабирование данного типа преобразователей для широкого диапазона выходных напряжений и рабочих мощностей.

В настоящее время на отечественном и зарубежном рынке электротехнической продукции доступны ВПЧ, реализованные в соответствии с топологиями, рассмотренными ранее. В табл. 2, на основании общедоступной информации [27], представлены обобщенные технические характеристики данного класса устройств силовой электроники ведущих мировых производителей, а в табл. 3 – отечественных компаний [28].

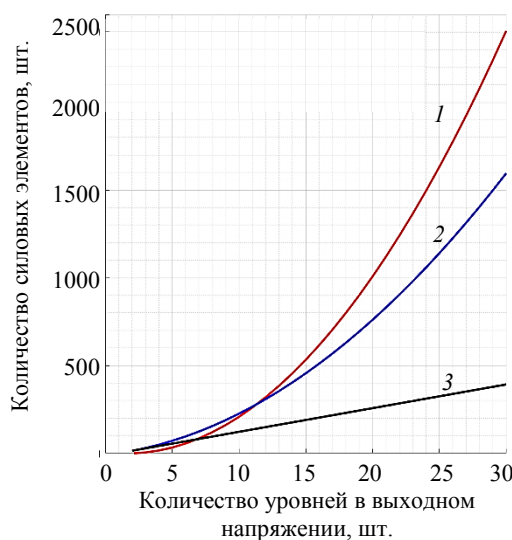


Рис. 1. Общее количество силовых элементов топологий: 1 – с фиксированной нейтралью; 2 – с плавающими конденсаторами; 3 – с каскадным включением Н-мостов
 Fig. 1. The total number of power elements of the considered topologies: 1 – fixed neutral; 2 – flying capacitors; 3 – cascaded H-bridge

Исходя из представленных в табл. 2 данных, можно заключить, что наибольшее распространение получили силовые преобразователи, построенные на базе топологии с каскадным включением Н-мостов. На российском рынке уже давно эксплуатируются ВПЧ специального исполнения от компаний «Siemens», «Nidec» и АВВ, а ведущие ки-

Табл. 1. Количественная зависимость компонентов силовых схем ВПЧ
 Tab. 1. Quantitative dependence of MV-VFDs components

Топология	Количество элементов		
	NPC	FLC	SCHB
Силовые ключи	$6(N-1)$	$6(N-1)$	$6(N-1)$
Обратные диоды	$6(N-1)$	$6(N-1)$	$6(N-1)$
Блокирующие диоды	$3(N-1)(N-2)$	0	0
Конденсаторы ЗПТ	$(N-1)$	$(N-1)$	$1.5(N-1)$
«Плавающие» конденсаторы	0	$1.5(N-1)(N-2)$	0
Общее количество силовых элементов	$(N-1)(3N-7)$	$0.5(N-1)(3N+20)$	$13.5(N-1)$

Табл. 2. Обобщенные характеристики зарубежных ВПЧ
Tab. 2. Generalized characteristics of international MV-VFDs

Производитель	Тип преобразователя	Мощность, МВт	Напряжение, кВ	Схема
ASI Robicon	Perfect Harmony	0.3...23	2.3...13.8	ML-SCHB
Allan Bradley	Power Flex 7000	0.15...25.3	2.4...6.6	CSI
Siemens	Masterdrive MV	0.66...9.1	2.3; 3.3; 4.16; 6	3L-NPC
	Masterdrie ML2	5...30	6.6; 3.3	3L-NPC
	Perfect Harmony	0.225...120	3; 6; 10	ML-SCHB
	Simovert-MV	0.6...7.2	2.3; 3.3; 4.16; 6.6	3L-NPC
ABB	ACS1000	0.3...5	2.3; 3.3; 4.16	3L-NPC
	ACS5000	4.4...20.5	6; 6.6; 6.9	ML-SCHB
	ACS6000	3...27	3; 3.3	3L-NPC
Alstom	VDM 5000	1.4...7.2	2.3; 3.3; 4.2	2L-VSC
	VDM 6000	0.3...8	2.3; 3.3; 4.2	4L-FLC
	VDM 7000	7...9.5	3.3	3L-NPC
General Electric	Dura-Bilt5 MV	0.3...2.4	4.16	3L-NPC
	MV-GP Type H	0.45...7.5	3.3; 4.16	ML-SCHB
Toshiba	T300MV2	0.225...7.5	2.4; 3.3; 4.16; 6.6; 6.9	3L(5L)-NPC
Nidec	Silcovert TH 14000	2.8...100	6.6...13.8	ML-SCHB
	Silcovert 7000	0.29...21.2	2.4...7.2	ML-SCHB
	Silcovert N	1.3...21.6	<3.3	3L-NPC
Nancal	NC HVVF	0.22...180	2.3...35	ML-SCHB
Vichi	ACH200	0.22...2	3; 3.3; 6; 6.6; 10; 11	ML-SCHB
	ACH100	0.25...10	6; 10	ML-SCHB
	ACP30	0.04...2.5	0.4; 0.66; 1.1; 2.3; 3.3	3L-NPC
Hiconics	HC1000	0.2...30	6; 10	ML-SCHB
	HC3000	0.2...2.3	6; 6.6; 10	3L-NPC
WEG	MVW3000	0.13...13	2.3; 3.3; 4.16; 5.5; 6.3; 6.9; 10; 11; 13.2; 13.8	ML-SCHB
	MVW01	0.4...20.6	2.3; 3.3; 4.16; 5.5; 6.3; 6.9; 10; 11; 13.2; 13.8	(3-9)L-NPC
INVT	GD5000	0.22...10.8	3; 3.3; 4.16; 6; 6.6; 10; 11	ML-SCHB
Inovance	HD9xs, HD7xs	0.2...30	3...13.8	ML-SCHB
	HD3x	2.4...45	2.3; 3.3	(3-5)L-NPC
Delta electronics	MVD22	0.135...1.3	3.3...10	ML-SCHB
	MVF23	0.135...2.2	3.3...6.6	ML-SCHB
	MVF20	0.25...10.9	3.3...11	ML-SCHB

тайские производители – INVT, «Inovance» и др., предлагают собственные технические решения, которые не уступают по своим сервисным функциям и техническим характеристикам европейским и американским аналогам.

На основании данных табл. 3 можно также отметить, что в качестве приоритетной конфигурации ВПЧ у отечественного производителя выступает топология ML-SCHB. Это – закономерный процесс развития многоуровневых структур на базе низковольтных силовых ячеек, так как технология их производства наиболее полно отлажена и уже много лет реализуется российскими производителями.

Совместный анализ табл. 2 и 3 также показывает, что российские ВПЧ имеют более узкий диапазон выходных мощностей и выходных напряжений, но при этом предлагается более гибкая адаптация типовых алгоритмов управления электроприводом и программного обеспечения к конкретным требо-

ваниям заказчика. При этом существенную проблему представляет отсутствие свободного доступа к зарубежным комплектующим и регулирование иностранного импорта. Помимо этого, ограниченный объем выпускаемой продукции не позволяют расширить номенклатуру собственных изделий, причем наиболее прибыльной, но и более трудоемкой и затратной нишей рынка электротехнической продукции, остаются электромеханические системы с особыми техническими требованиями для специального и двойного назначения.

Далее предлагается рассмотреть различные подходы к повышению надежности ВПЧ и методы управления выходным напряжением ячеек в аварийных режимах работы, приведенные в табл. 3. Для исключения из силовой цепи неработоспособной ячейки без непосредственной остановки ВПЧ с соблюдением требования симметрии выходных напряжений.

Табл. 3. Обобщенные характеристики отечественных ВПЧ
Tab. 3. Generalized characteristics of domestic MV-VFDs

Производитель	Тип преобразователя	Мощность, МВт	Напряжение, кВ	Схема
ООО «НПП ИТСПб»	Геркулес	0.185...7.1	3; 3.3; 4.16; 6; 6.6; 10; 11	ML-SCHB
АО «Электромаш»	РИТМ-В	0.25...15	3; 6; 10	ML-SCHB
ЗАО «ЭРАСИБ»	ЭРАТОН-В	0.25...15	3.3; 6; 10	ML-SCHB
ООО «Электротекс-ИН»	ПЧВМ	0.25...6.3	3; 6; 10	ML-SCHB
АО «ЧЭАЗ»	ВЧРП-ТМ	0.25...14.5	3; 6; 10	ML-SCHB
ООО «ТЭС»	СИРИУС-ВВПЧ	0.22...14	3; 6; 10	ML-SCHB
ООО «НПО Рустмаш»	АТ27	0.16...8	3; 3.3; 4.6; 6; 10; 11	ML-SCHB
ООО «Л-Старт»	ВПЧА	0.4...25	3; 6; 10	ML-SCHB
ООО «НПП Бэлком»	АВПЧ	1...10	6; 10	ML-SCHB
	ПЧСВ	1...10	6; 10	CSI
ЗАО «НПО Строй-техавтоматика»	СТА-В9.HVI	0.315...8	3; 6; 10	ML-SCHB
АО «Силовые машины»	ТПЧ	9.14	6	CSI
ООО «НПП ЭКРА»	ЭСН	0.25...8 (<100)	3; 6; 10	ML-SCHB
	ЭМСН	0.315...40	3; 6; 10; 35	MMC
	ШПТУ-ВИР	<100	3; 6; 10; 15	CSI

Табл. 4. Сравнение функциональных возможностей ВПЧ
Tab. 4. Comparison of MV-VFDs functionality

Реализованные алгоритмы	Фирма производитель										
	ООО «НПП ИТСПб»	АО «Электромаш»	ЗАО «ЭРАСИБ»	ООО «Электротекс-ИН»	АО «ЧЭАЗ»	ООО «ТЭС»	ООО "НПО Рустмаш"	ООО "Л-Старт"	ООО «НПП Бэлком»	ЗАО «НПО Стройтех-автоматика»	ООО «НПП ЭКРА»
Алгоритм синхронного перевода двигателя на сеть	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Алгоритм байпаса уровня силовых ячеек с понижением выходного напряжения	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Алгоритм байпаса силовой ячейки с вводом резерва с сохранением номинально выходного напряжения	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Алгоритм байпаса силовой ячейки с управлением напряжением ЗПТ активным выпрямителем	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Алгоритм диагностики и реконфигурации силовой части и изменения режима коммутации	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Алгоритма байпаса силовой ячейки и смещения нейтральной точки системы фазных напряжений для поддержания симметрии линейных напряжений	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓

В настоящее время предложены следующие технические решения: ввод силовой ячейки из горячего резерва на место вышедшего из работы модуля, реализуемого за счет избыточности (рис. 2, а); нагрузочное резервирование, основанное на запасе по напряжению оставшихся в работе силовых модулей и построенное за счет увеличения мощности силового трансформатора, напряжения звена постоянного тока (ЗПТ), класса полупроводниковых приборов (рис. 2, б); отключение равного количества силовых модулей в фазах (рис. 2, в); метод желаемого смещения нейтральной точки n инвертора, базирующийся на модификации типового алгоритма управления (рис. 2, г). Для демонстрации всех алгоритмов ре-

зервирования на рис. 2 приведены векторные диаграммы системы фазных (u_U, u_V, u_W) и линейных (u_{UV}, u_{VW}, u_{WU}) напряжений для 11-уровневого инвертора. На рис. 2 жирные стрелки иллюстрируют переход инвертора от исходного состояния к одному из вариантов резервирования, а отрезки, отделенные штрихами, показывают число рабочих силовых ячеек в соответствующей фазе.

По данным из табл. 4 также можно отметить, что всеми производителями реализованы основные методы резервирования и перевода двигателя на сеть. Отдельно стоит отметить наличие алгоритма смещения нейтральной точки у большинства ведущих производителей.

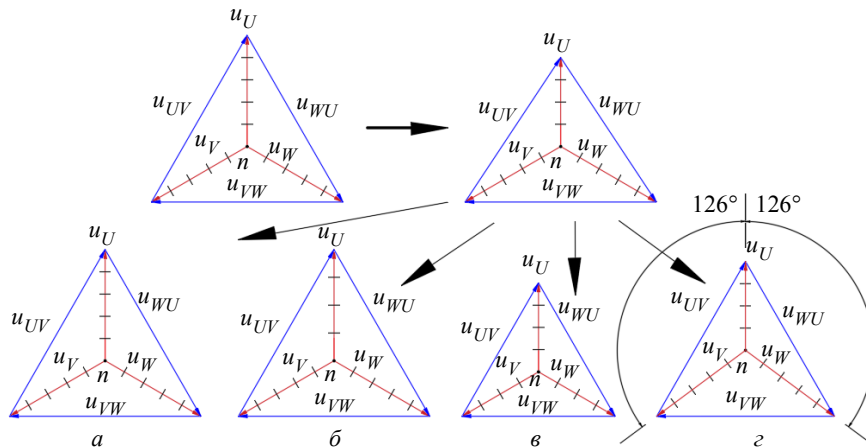


Рис. 2. Векторные диаграммы выходных фазных и линейных напряжений ВПЧ для различных методов замены поврежденной ячейки и поддержания симметрии выходных напряжений ВПЧ: а – ввод горячего резерва; б – нагрузочное резервирование; в – байпас равного числа ячеек; г – метод смещения нейтрали
Fig. 2. Vector diagrams of MV-VFD output phase and line voltages for various methods of replacing damaged cells and maintaining symmetry of MV-VFD output voltages: а – hot reserve input; б – load redundancy; в – bypass of an equal number of cells; г – neutral shift method

Метод смещения нейтрали, впервые описанный в 2002 г., основывается на фиксированном увеличении амплитуды задающих воздействий на выходные напряжения, включением в алгоритм широтно-импульсной модуляции (ШИМ) дополнительного канала [29]. В свою очередь, решение нелинейной системы уравнений для определения углового смещения выходных напряжений в соответствии с условием симметрии проанализировано в большом количестве публикаций [30]–[32], включая и нереализуемые комбинации. На рис. 3 приведена пространственная диаграмма доступных состояний 11-уровневого инвертора с применением различных методов резервирования, на котором в качестве N_A , N_B и N_C обозначено количество рабочих силовых ячеек в соответствующей стойке инвертора, цветом обозначено доступное линейное выходное напряжение в относительных единицах.

Исходя из статистических данных [33], порядка 30 % аварийных ситуаций в ВПЧ связано с конденсаторными батареями; 26 % – с отказом плат управления; 13 % – с нарушением контактного соединения, образованного пайкой; 21 % вызваны неисправностями силовых модулей; 3 % – повреждением разъемных соединений и, наконец, 7 % обусловлены прочими причинами (рис. 4), причем порядка 38 % отказов приходится на силовые ячейки [34].

При эксплуатации силовых ячеек возможно нарушение одного из следующих базовых принципов сервисного обслуживания:

1. Применяется повторное использование силовых ключей после воздействия дуги или взрыва

одной из стоек, что приводит к повторному выходу из строя силовой ячейки.

2. Выполняется установка силовых модулей разных производителей в одну силовую ячейку, что ведет к неравномерному нагреву силовых модулей.

3. Нарушаются требования затяжки болтовых соединений, что приводит к срезу внутренней резьбы конденсаторных батарей, уменьшению емкости ЗПТ и отсутствию должного контакта между шинами ЗПТ.

4. Отсутствует замена поврежденных или высохших разъемов. При взрыве силовой ячейки, например, может отсутствовать контакт датчика вспышки и преобразователь не будет отключен, что приведет к образованию межфазного или межобмоточного короткого замыкания силового согласующего трансформатора.

5. Отсутствует проверка силовых ячеек номинальными током и напряжением на испытательном стенде после выполнения ремонта силами предприятия.

Вышеописанные проблемы не могут быть полностью предотвращены за счет введения методов резервирования в систему ВПЧ. Ввод горячего резерва на место каждой поврежденной ячейки чрезмерно удорожает конструкцию ВПЧ, требуются дополнительные обмотки для силового трансформатора и дополнительные шкафы для размещения силовых ячеек. Напротив, введение изменений только в программное обеспечение ВПЧ за счет добавления алгоритма смещения нейтрали позволяет обеспечить работу для большего числа комбинаций силовых ячеек (рис. 3, в).

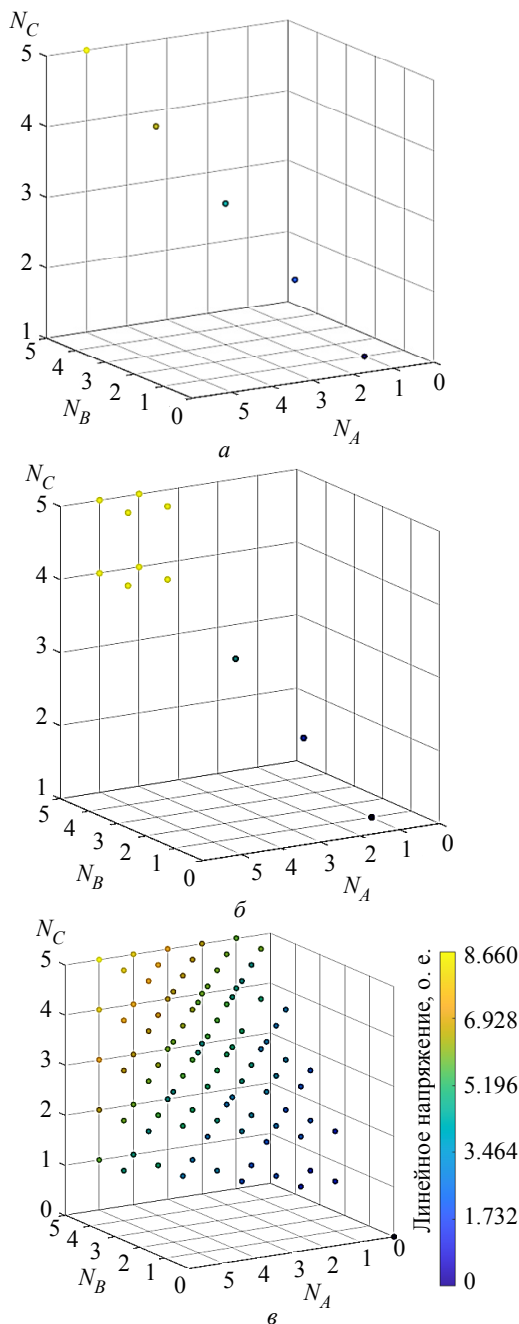


Рис. 3. Доступные состояния и напряжения на выходе 11-уровневого инвертора с неуправляемым выпрямителем с применением методов резервирования: а – нагрузочное или байпас равного числа ячеек; б – ввод резерва; в – метод смещения нейтрали
 Fig. 3. Available states and voltages at the output of an 11-level inverter with an uncontrolled rectifier using redundancy methods: а – load or bypass of an equal

Предлагается оценить возможность поддержания выходного напряжения при использовании алгоритмов шунтирования силовых ячеек по уровню и смещения нейтрали.

Количественная оценка уровня выходных координат электропривода при использовании методов резервирования. Здесь проводится анализ влияния на электромагнитный момент и угловую

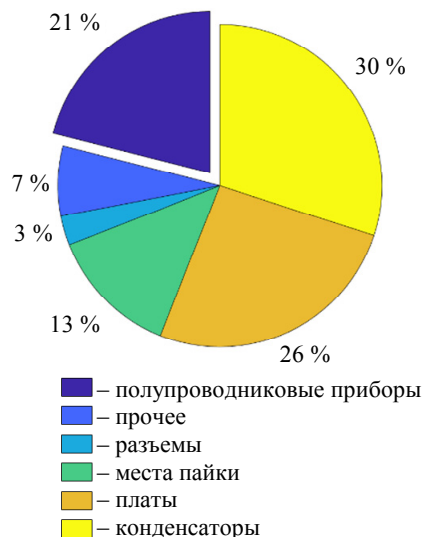


Рис. 4. Соотношение отказов компонентов ВПЧ
 Fig. 4. MV-VFD component failure ratio

скорость вращения ротора наиболее распространенных алгоритмов резервирования зарубежных производителей, основанных на шунтировании поврежденного модуля с применением алгоритма смещения нейтральной точки ВПЧ.

В общепромышленных механизмах, которые подразделяются на механизмы с постоянным моментом нагрузки, в число которых входят конвейеры, подъемники, шаровые мельницы и т. д.; механизмы с вентиляторным характером нагрузки – такие, как насосы, центробежные машины, вентиляторы и т. д., а также механизмы с постоянной мощностью металло- и деревообрабатывающие станки, ветрогенераторы и т. п.; наиболее часто применяются частотно-регулируемые электроприводы с векторным управлением, включая бездатчиковое исполнение.

На основании базовой структуры управляющей части электромеханической системы данного класса на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКЗ) для однозонного регулирования [35], структура которой показана на рис. 5, осуществляется анализ изменения момента и угловой скорости вала асинхронной машины в случае снижения выходного напряжения в аварийных режимах работы ВПЧ, которое производится путем сравнения с эталонными величинами. На рис. 5 обозначены: БДТН-В – блок датчиков тока и напряжений с приведением к ортогональным осям α , β ; $I_{s\alpha}$, $I_{s\beta}$, $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ – ток и напряжения статора в ортогональных осях α , β ; ДС – датчик скорости вращения ротора ЭД; РС – регулятор скорости вращения ротора ЭД ($\omega_{\text{мех}}$);

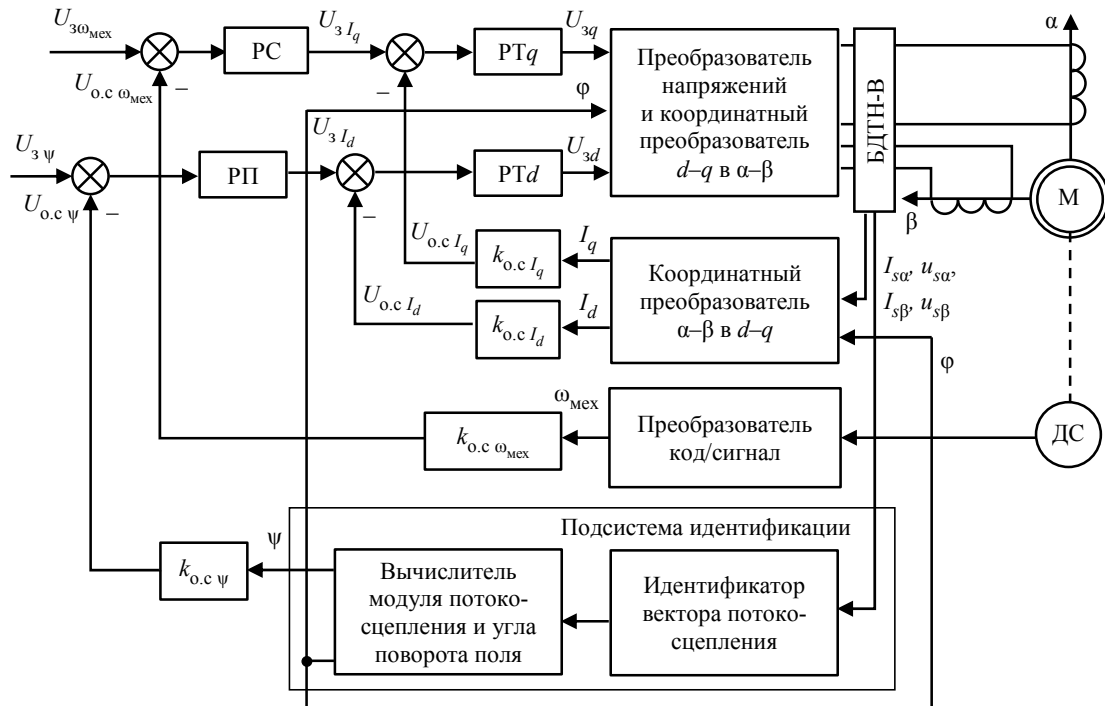


Рис. 5. Структурная схема системы векторного управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором в ортогональных осях α, β

Fig. 5. Structural diagram of the vector control system for a squirrel cage induction motor in orthogonal axes α, β

PTq, PTd – регуляторы тока по моментобразующей оси I_q и по оси намагничивания I_d ; РП – регулятор потокосцепления ψ ; М – электродвигатель (ЭД); $k_{o.c I_q}$, $k_{o.c I_d}$, $k_{o.c \omega_{мех}}$, $k_{o.c \psi}$ – коэффициенты отрицательной обратной связи (ООС) по соответствующим координатам; $U_{3\omega_{мех}}$, $U_{3 I_q}$, $U_{3 I_d}$, $U_{3 \psi}$ – сигналы задания на контур регулирования соответствующей координаты; $U_{o.c \omega_{мех}}$, $U_{o.c I_q}$, $U_{o.c I_d}$, $U_{o.c \psi}$ – сигналы обратной связей соответствующих координат; U_{3q} , U_{3d} – задания напряжения по соответствующей оси; φ – угол поворота поля. Независимое задание на регулятор потокосцепления подбирается из условия сохранения работоспособности алгоритма векторного управления. При этом должно обеспечиваться условие поддержания максимальной возможной скорости вращения и электромагнитного момента ЭД. При этом повреждение электропривода (ЭП), связанное со снижением выходного напряжения ВПЧ, моделируется изменением коэффициента передачи широтно-импульсного преобразователя в имитационной модели, что оказывает непосредственное изменение двухфазной системы напряжений по осям α и β по амплитуде напряжений питания, поступающих на модель АДКЗ. Связь коэффициента передачи между трехфазной системой

выходных линейных напряжений инвертора U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} и двухфазной системы U_α и U_β получена при допущении отсутствия сдвига фаз фазных напряжений U_a , U_b , U_c .

В табл. 5 приведены параметры ЭД Siemens 1TZ1535-8BT02-Z, использованные для моделирования. Данные ЭД получены опытным путем в процессе наладки данного оборудования.

Табл. 5. Параметры электродвигателя Siemens 1TZ1535-8BT02-Z

Tab. 5. Parameters of Siemens motor 1TZ1535-8BT02-Z

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, кВт	12 000
Номинальное напряжение, В	7200
Номинальный ток, А	1130
Номинальная частота, Гц	100
Число полюсов	4
Номинальная частота вращения, об/мин	2994
Номинальный момент, Нм	38 300
Коэффициент мощности, о. е.	0.875
КПД, %	97.4
Момент инерции, кг · м ²	287
Сопротивление обмотки статора при 20 °С, мОм	5.82
Индуктивность обмотки статора, мГн	0.8
Постоянная времени ротора, с	5.26
Индуктивность цепи намагничивая, мГн	19.6
Номинальное потокосцепление, Вс	8.89
Ток холостого хода, А	416

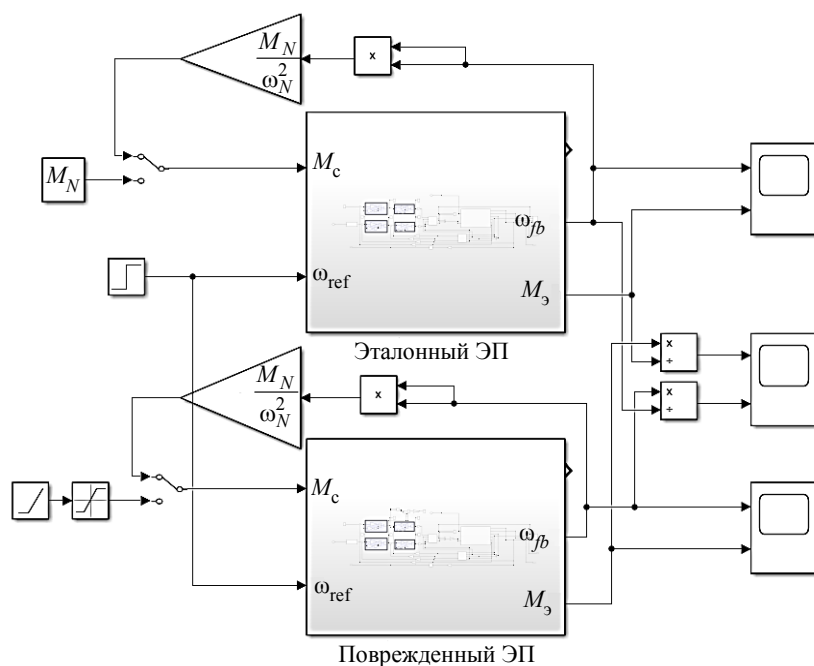


Рис. 6. Модель сравнения ЭП в аварийном режиме работы при различных алгоритмах резервирования
 Fig. 6. The model for comparing VFD in emergency operation with different redundancy algorithms

В табл. 6 сведены расчетные значения выходного линейного напряжения для различных комбинаций силовых ячеек в фазах инвертора ВПЧ. Численные значения напряжения могут быть получены через решение системы уравнений предложенной в [28], [30] или [29], [31], [32].

На рис. 6 приведена имитационная модель для сравнения поврежденного ЭП с эталонным, построенная по структуре, показанной на рис. 5. На рис. 6 обозначены: M_N – номинальный момент ЭД; ω_N – номинальная скорость вращения ротора ЭД; M_c – момент сопротивления; M_3 – электромагнитный момент ЭД; ω_{ref} , ω_{fb} – задание и обратная связь по скорости вращения ротора ЭД. В табл. 6 представлены результаты структурного моделирования в программной среде MatLab/Simulink при различных дискретных уровнях выходного напряжения инвертора.

Как ранее было показано на рис. 2 и 3, применение алгоритма смещения нейтрали обеспечивает возможность работы электропривода в аварийном режиме при большем числе комбинаций поврежденных ячеек. При этом применение данного алгоритма позволяет обеспечить большую амплитуду выходного линейного напряжения в отличие от алгоритма шунтирования по уровню. По результатам структурного моделирования, представленным в табл. 6, видно, что сни-

жение момента и угловой скорости ЭД при управлении заданием на контур потокосцепления в общем случае меньше для алгоритма смещения нейтрали. При этом закладываемый запас по напряжению в систему может быть существенно ниже, чем применение такого же метода для алгоритма шунтирования по уровню.

Например, при повреждении одной ячейки для алгоритма смещения нейтрали при наличии регулятора ослабления потокосцепления и запаса по напряжению ЭП может продолжить работу со 100 %-ной скоростью и 100 %-ным номинальным моментом на валу, в отличие от алгоритма шунтирования по уровню, которому приходится отключить уровень силовых ячеек и потерять 20 % выходного напряжения в рамках рассматриваемого примера.

Выход из строя 1–2 силовых ячеек в одной фазе на практике встречается достаточно часто, снижение выходного напряжения до 60 % недопустимо для ответственных механизмов, что ведет к снижению производительности или отключению оборудования. Наличие же алгоритма смещения нейтрали позволяет работать в комбинациях 5–5–3, 5–4–3, 5–3–3 и т. д. длительно обеспечивая заведомо больший уровень выходного напряжения.

Результаты, приведенные в табл. 5, коррелируют с данными, приводимыми в [36].

Табл. 6. Соотношение допустимого электромагнитного момента и скорости вращения ЭД в аварийных режимах работы ЭП

Tab. 6. Ratio of permissible electromagnetic torque and motor rotation speed in emergency operation modes of the electric drive

Режим работы	Комбинация силовых ячеек 11-уровневого инвертора	Линейные напряжения на выходе инвертора		Скалярный алгоритм управления $U \sim f[37]$		Векторный алгоритм управления [35], [37]			
		о. е.	%	при $M \sim \omega^2$		при $M = \text{const}$		$M_{\text{э}}, \%$	$\omega_{\text{мех}}, \%$
				$M_{\text{э}}, \%$	$\omega_{\text{мех}}, \%$	$M_{\text{э}}, \%$	$\omega_{\text{мех}}, \%$		
Номинальный	5-5-5	8.66	100	100	100	100	100	100	100
Аварийный. Парирование аварии с применением алгоритма смещения нейтрали	5-5-4 4-5-5 5-4-5	8.04	92.84	86.2	92.84	100	100	100	100
Аварийный. Парирование аварии с применением алгоритма смещения нейтрали	5-4-4 4-4-5 4-5-4	7.45	86.03	74.0	86.03	96.87	98.4	100	96.24
Аварийный. Парирование аварии с применением алгоритма шунтирования по уровню	4-4-4	6.93	80.0	64.0	80.0	91.43	95.66	100	89.05

Обсуждение результатов. Модульность и линейная зависимость числа компонентов от уровня выходного напряжения (рис. 1) делают топологию ML-SCHB предпочтительной для реализации отказоустойчивых систем. Изолированность ячеек позволяет исключать неисправные модули без остановки преобразователя, что особенно важно для ответственных применений. Сравнительный анализ зарубежных и отечественных ВПЧ (табл. 2, 3) подтверждает доминирование топологии ML-SCHB на рынке, что связано не только с ее техническими преимуществами, но и с отработанной технологией производства низковольтных силовых ячеек и преобразователей в России.

Результаты моделирования (табл. 6) наглядно демонстрируют, что алгоритм смещения нейтрали обеспечивает более высокий уровень сохранения выходных характеристик электропривода по сравнению с алгоритмом шунтирования по уровню. Например, при отказе одной ячейки в одной фазе (комбинация 5-5-4) применение смещения нейтрали в сочетании с векторным управлением позволяет сохранить 100 % момента и скорости, тогда как шунтирование по уровню (комбинация 4-4-4) приводит к снижению линейного напряжения на 20 % и соответствующему падению момента на 36 % при скалярном управлении. Это объясняется способностью алгоритма компенсировать дисбаланс фазных напряжений за счет управляемого смещения нейтральной точки, что позволяет полнее использовать потенциал оставшихся исправных ячеек (рис. 2, 3).

Методика модификации обратной матрицы Кларка, изложенная в [28], [30], позволяет провести модификацию программного обеспечения ВПЧ и внедрить алгоритм смещения нейтрали в существующие преобразователи частоты без модификации силовой части. Для стабильной работы потребуется дооснащение ЭП регуляторами ослабления поля и коэффициента мощности.

Важным практическим преимуществом алгоритма смещения нейтрали служит возможность его реализации с электромеханическим и полупроводниковым шунтированием. Применение электромеханического шунтирования снижает тепловые потери по сравнению с постоянно активными полупроводниковыми ключами.

Выводы и заключение. Представленный в данной статье сравнительный анализ достоинств и недостатков различных топологий силовой части ВПЧ позволяет констатировать, что конфигурация многоуровневого инвертора с каскадным включением H-мостов (ML-SCHB) обладает рядом преимуществ по отношению к другим аналогам с точки зрения модульности и масштабируемости, что обусловило ее широкое распространение в составе высокомоментных электромеханических систем среднего и высокого классов напряжений.

Рассмотренные в статье методы резервирования показали эксплуатационные преимущества алгоритма смещения нейтральной точки, который обеспечивает поддержание симметрии линейных напряжений при отказе силовых ячеек с помощью модификации алгоритма векторного управления без необходимости аппаратной избыточности, что

подтверждается результатами цифрового моделирования. Результаты расчетов хорошо согласуются с данными публикаций [29], [31], [32], [38].

Перспективными направлениями дальнейших исследований служат:

1. Разработка интеллектуальных алгоритмов диагностики и автоматического переключения между методами резервирования в зависимости от характера и количества отказов.

2. Исследование влияния алгоритма смещения нейтрали на долговременную надежность изоляции двигателя и подшипниковых узлов.

3. Исследование и разработка интеллектуального регулятора коэффициента мощности в системе с алгоритмом смещения нейтрали.

4. Создание высоковольтных контакторов шунтирования с оптической обратной связью для повышения надежности контроля состояния цепей шунтирования.

5. Исследование и разработка алгоритмов контроля состояния контакторов шунтирования по переходному процессу тока и напряжения в условиях электромагнитных помех, обусловленных импульсными токами заряда ЗПТ силовых ячеек и ШИМ выходного напряжения ВПЧ.

6. Исследование и разработка алгоритмов балансировки ЗПТ силовых ячеек при активации алгоритма смещения нейтрали в режимах ХХ и генераторного торможения при отсутствии тормозного модуля в силовой ячейке.

Список литературы

1. Wu B. High-power converters and AC drives. Chichester: John Wiley, 2006. 307 p. doi: 10.1002/0471773719.

2. González S. A., Verne S. A., Valla M. I. Multilevel converters for industrial applications. Boca Raton: CRC Press, 2014. 321 p. doi: 10.1201/b15252.

3. Gupta K. K., Bhatnagar P. Multilevel inverters: conventional and emerging topologies and their control. London: Elsevier/Academic Press, 2018. 322 p. doi: 10.1016/C2016-0-03360-0.

4. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. A New neutral-point-clamped PWM inverter // IEEE Trans. on Industry Appl. 1981. Vol. IA-17, no. 5. P. 518–523. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.

5. Salem A., Abido M. A. T-Type multilevel converter topologies: A comprehensive review // Arabian J. for Sci. and Engin. 2019. Vol. 44, no. 3. P. 1713–1735. doi: 10.1007/s13369-018-3506-6.

6. Bruckner T., Bernet S. Loss balancing in three-level voltage source inverters applying active NPC switches // 2001 IEEE 32nd Ann. Power Electron. Specialists Conf. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2001. Vol. 2. P. 1135–1140. doi: 10.1109/PESC.2001.954272.

7. Bruckner T., Bernet S., Guldner H. The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control // IEEE Trans. on Industrial Electron. 2005. Vol. 52, no. 3. P. 855–868. doi: 10.1109/TIE.2005.847586.

8. Active neutral-point-clamped multilevel converters / P. Barbosa, P. Steimer, L. Meysenc, M. Winkelkemper, J. Steinke, N. Celanovic // IEEE 36th Conf. on Power Electron. Specialists. Aachen, Germany: IEEE, 2005. P. 2296–2301. doi: 10.1109/PESC.2005.1581952.

9. Meynard T. A., Foch H. Multi-level choppers for high voltage applications // EPE J. 1992. Vol. 2, no. 1. P. 45–50. doi: 10.1080/09398368.1992.11463285.

10. A Multilevel inverter scheme with dodecagonal voltage space vectors based on flying capacitor topology for Induction motor drives / J. Mathew, P. P. Rajeevan, K. Mathew, N. A. Azeez, K. Gopakumar // IEEE Trans. on

Power Electron. 2013. Vol. 28, no. 1. P. 516–525. doi: 10.1109/TPEL.2012.2195784.

11. Marchesoni M., Mazzucchelli M., Tenconi S. A nonconventional power converter for plasma stabilization // IEEE Trans. on Power Electron. 1990. Vol. 5, no. 2. P. 212–219. doi: 10.1109/PESC.1988.18125.

12. Lesnicar A., Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf. Proc. Bologna, Italy: IEEE, 2003. Vol. 3. 6 p. doi: 10.1109/PTC.2003.13044403.

13. Neutral-point voltage analysis and suppression for NPC three-level photovoltaic converter in LVRT operation under imbalanced grid faults with selective hybrid SVPWM strategy / Y. Li, X. Yang, W. Chen, T. Liu, F. Zhang // IEEE Trans. on Power Electron. 2019. Vol. 34, no. 2. P. 1334–1355. doi: 10.1109/TPEL.2018.2834226.

14. Thermal stress and high temperature effects on power devices in a fault-resilient NPC IGCT-based converter / A. V. Rocha, B. de Jesus Cardoso Filho, G. K. Moghaddam, R. D. Gould, S. Bhattacharya // IEEE Trans. on Power Electron. 2016. Vol. 31, no. 4. P. 2800–2807. doi: 10.1109/APEC.2014.6803659.

15. Lopes L. A. C., Soleimanpour N. Power losses balancing in a three-level NPC converter driving a PMSM in an electric vehicle // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2015. P. 1660–1665. doi: 10.1109/ECCE.2015.7309894.

16. A Dual three-level T-NPC inverter for high-power traction applications / S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joós, J.-M. Cyr, J. Xu // IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electron. 2016. Vol. 4, no. 2. P. 668–678. doi: 10.1109/JESTPE.2016.2517819.

17. Leakage Current Suppression of three-phase flying capacitor PV inverter with new carrier modulation and logic function / X. Guo, B. Wei, T. Zhu, Zh. Lu, L. Tan, X. Sun // IEEE Trans. on Power Electron. 2018. Vol. 33, no. 3. P. 2127–2135. doi: 10.1109/TPEL.2017.2692753.

18. 5L full-scale converter with a DC-link flying-capacitor auxiliary bridge leg for large direct-drive wind turbines / W. Hang, Z. Xiang-jun, Zh. Meime, H. Yingying, Zh. Xiao, Y. Xu // *IET Electr. Power Appl.* 2017. Vol. 11, no. 6. P. 1001–1012. doi: 10.1049/iet-epa.2016.0251.
19. Pat. № US3867643A USA. Electric power converter / R. H. Baker, L. H. Bannister. Assigne: Massachusetts Institute of Technol. Appl. 14.01.74; publ. 18.02.75. 17 p.
20. Leon J. I., Vazquez S., Franquelo L. G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications // *Proc. of the IEEE.* 2017. Vol. 105, no. 11. P. 2066–2081. doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583.
21. Hybrid multilevel converter with cascaded H-bridge cells for HVDC applications: Operating principle and scalability / G. P. Adam, I. A. Abdelsalam, K. H. Ahmed, B. W. Williams // *IEEE Trans. on Power Electron.* 2015. Vol. 30, no. 1. P. 65–77. doi: 10.1109/TPEL.2014.2303111.
22. High power synchronous machine fed by a cascaded regenerative inverter / J. R. Rodriguez, J. Pontt, M. Perez, P. Lezana, P. W. Hammond // 2008 IEEE Industry Appl. Soc. Ann. Meeting (IAS). Edmonton, Alberta, Canada: IEEE, 2008. 7 p. doi: 10.1109/08IAS.2008.339.
23. Renge M. M., Suryawanshi H. M. Five-level diode clamped inverter to eliminate common mode voltage and reduce DV/DT in medium voltage rating induction motor drives // *IEEE Trans. on Power Electron.* 2008. Vol. 23, no. 4. P. 1598–1607. doi: 10.1109/TPEL.2008.925423.
24. Common-mode voltage elimination in multilevel power inverter-based motor drive applications / E. Robles, M. Fernandez, J. Zaragoza, I. Aretxabaleta, I. M. De Alegria, J. Andreu // *IEEE Access.* 2022. Vol. 10. P. 2117–2139. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137892.
25. Alavi O., Hooshmand Viki A., Shamlou S. A comparative reliability study of three fundamental multilevel inverters using two different approaches // *Electronics.* 2016. Vol. 5, no. 2. P. 18. doi: 10.3390/electronics5020018.
26. Lakhdari M., Rabhi B., Benaissa A. A new structural reconfiguration for multilevel inverters with fault tolerance capability // *Acta Polytechnica.* 2024. Vol. 64, no. 4. P. 379–384. doi: 10.1016/j.epr.2018.11.013.
27. Виноградов А. Б., Коротков А. А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты. Иваново: Изд-во ИванГЭУ им. В. И. Ленина, 2018. 184 с.
28. Сидоров Г. С. Управление многоуровневыми преобразователями частоты на базе каскадного включения H-мостов в аварийных режимах работы высоковольтного электропривода // *Мат. Всерос. науч.-практ. конф. «Информационно-телекоммуникационные системы и технологии (ИТСИТ)».* Кемерово: Изд-во КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева, 2025. С. 483–487.
29. Hammond P. W. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives // *IEEE Trans. on Industrial Electron.* 2002. Vol. 49, no. 5. P. 948–954. doi: 10.1109/TIE.2002.803172.
30. Нос О. В., Дыбко М. А., Нос Н. И. Алгоритмы управления многоуровневым инвертором напряжения с каскадным включением H-мостов в аварийном режиме работы // *Электротехника.* 2021. № 12. С. 37–47.
31. Lezana P., Ortiz G. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition // *IEEE Trans. on Industrial Electron.* 2009. Vol. 56, no. 7. P. 2697–2703. doi: 10.1109/TIE.2009.2019771.
32. Jeongwoo K., Younghoon C. Improved neutral shift method for fault tolerant operation of three phase MLCI // *J. of Power Electron.* 2021. Vol. 21, no. 8. P. 49–58. doi: 10.1007/s43236-020-00161-0.
33. Siva Priya A., Kalaiarasi N. An extensive review on fault detection and fault-tolerant control of multilevel inverter with applications // *Intern. J. of Renewable Energy Research.* 2022. Vol. 12, no. 2. P. 244–261.
34. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review / S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, P. Tavner // *IEEE Trans. on Power Electron.* 2010. Vol. 25, no. 11. P. 2734–2752. doi: 10.1109/TPEL.2010.2049377.
35. Панкратов В. В., Котин Д. А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового векторного управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 125 с.
36. Operation of a medium-voltage drive under faulty conditions / J. Rodriguez, P. W. Hammond, J. Pontt, R. Musalem, P. Lezana, M. J. Escobar // *IEEE Trans. on Industrial Electron.* 2005. Vol. 52. № 4. P. 1080–1085. doi: 10.1109/TIE.2005.851645.
37. Eaton D., Rama J., Hammond P. Neutral shift: Five years of continuous operation with adjustable frequency drives // *IEEE Industry Appl. Magazine.* 2003. Vol. 9, no. 6. P. 47–54. doi: 10.1109/MIA.2003.1245795.
38. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. Иваново: Изд-во ИванГЭУ им. В. И. Ленина, 2008. 298 с.

Информация об авторах

Нос Олег Викторович – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры проектирования технологических машин Новосибирского гос. технического университета, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия.
E-mail: nos@corp.nstu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5737-5354>

Сидоров Георгий Сергеевич – мл. науч. сотр. Центра технологического превосходства Новосибирского государственного технического университета, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630073, Россия.
E-mail: georgiy@mail.ru

References

1. Wu B. High-power converters and AC drives. Chichester: John Wiley, 2006. 307 p. doi: 10.1002/0471773719.
2. González S. A., Verne S. A., Valla M. I. Multilevel converters for industrial applications. Boca Raton: CRC Press, 2014. 321 p. doi: 10.1201/b15252.
3. Gupta K. K., Bhatnagar P. Multilevel inverters: conventional and emerging topologies and their control. London: Elsevier/Academic Press, 2018. 322 p. doi: 10.1016/C2016-0-03360-0.
4. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. A New neutral-point-clamped PWM inverter // IEEE Trans. on Industry Appl. 1981. Vol. IA-17, no. 5. P. 518–523. doi: 10.1109/TIA.1981.4503992.
5. Salem A., Abido M. A. T-Type multilevel converter topologies: A comprehensive review // Arabian J. for Sci. and Engin. 2019. Vol. 44, no. 3. P. 1713–1735. doi: 10.1007/s13369-018-3506-6.
6. Bruckner T., Bernet S. Loss balancing in three-level voltage source inverters applying active NPC switches // 2001 IEEE 32nd Ann. Power Electron. Specialists Conf. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2001. Vol. 2. P. 1135–1140. doi: 10.1109/PESC.2001.954272.
7. Bruckner T., Bernet S., Guldner H. The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control // IEEE Trans. on Industrial Electron. 2005. Vol. 52, no. 3. P. 855–868. doi: 10.1109/TIE.2005.847586.
8. Active neutral-point-clamped multilevel converters / P. Barbosa, P. Steimer, L. Meysenc, M. Winkelkemper, J. Steinke, N. Celanovic // IEEE 36th Conf. on Power Electron. Specialists. Aachen, Germany: IEEE, 2005. P. 2296–2301. doi: 10.1109/PESC.2005.1581952.
9. Meynard T. A., Foch H. Multi-level choppers for high voltage applications // EPE J. 1992. Vol. 2, no. 1. P. 45–50. doi: 10.1080/09398368.1992.11463285.
10. A Multilevel inverter scheme with dodecagonal voltage space vectors based on flying capacitor topology for induction motor drives / J. Mathew, P. P. Rajeevan, K. Mathew, N. A. Azeez, K. Gopakumar // IEEE Trans. on Power Electron. 2013. Vol. 28, no. 1. P. 516–525. doi: 10.1109/TPEL.2012.2195784.
11. Marchesoni M., Mazzucchelli M., Tenconi S. A nonconventional power converter for plasma stabilization // IEEE Trans. on Power Electron. 1990. Vol. 5, no. 2. P. 212–219. doi: 10.1109/PESC.1988.18125.
12. Lesnicar A., Marquardt R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conf. Proc. Bologna, Italy: IEEE, 2003. Vol. 3. 6 p. doi: 10.1109/PTC.2003.1304403.
13. Neutral-point voltage analysis and suppression for NPC three-level photovoltaic converter in LVRT operation under imbalanced grid faults with selective hybrid SVPWM strategy / Y. Li, X. Yang, W. Chen, T. Liu, F. Zhang // IEEE Trans. on Power Electron. 2019. Vol. 34, no. 2. P. 1334–1355. doi: 10.1109/TPEL.2018.2834226.
14. Thermal stress and high temperature effects on power devices in a fault-resilient NPC IGCT-based converter / A. V. Rocha, B. de Jesus Cardoso Filho, G. K. Moghaddam, R. D. Gould, S. Bhattacharya // IEEE Trans. on Power Electron. 2016. Vol. 31, no. 4. P. 2800–2807. doi: 10.1109/APEC.2014.6803659.
15. Lopes L. A. C., Soleimanpour N. Power losses balancing in a three-level NPC converter driving a PMSM in an electric vehicle // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2015. P. 1660–1665. doi: 10.1109/ECCE.2015.7309894.
16. A Dual three-level T-NPC inverter for high-power traction applications / S. Bhattacharya, D. Mascarella, G. Joós, J.-M. Cyr, J. Xu // IEEE J. of Emerging and Selected Topics in Power Electron. 2016. Vol. 4, no. 2. P. 668–678. doi: 10.1109/JESTPE.2016.2517819.
17. Leakage Current Suppression of three-phase flying capacitor PV inverter with new carrier modulation and logic function / X. Guo, B. Wei, T. Zhu, Zh. Lu, L. Tan, X. Sun // IEEE Trans. on Power Electron. 2018. Vol. 33, no. 3. P. 2127–2135. doi: 10.1109/TPEL.2017.2692753.
18. 5L full-scale converter with a DC-link flying-capacitor auxiliary bridge leg for large direct-drive wind turbines / W. Hang, Z. Xiang-jun, Zh. Meime, H. Yingying, Zh. Xiao, Y. Xu // IET Electr. Power Appl. 2017. Vol. 11, no. 6. P. 1001–1012. doi: 10.1049/iet-epa.2016.0251.
19. Pat. № US3867643A USA. Electric power converter / R. H. Baker, L. H. Bannister. Assignee: Massachusetts Institute of Technol. Appl. 14.01.74; publ. 18.02.75. 17 p.
20. Leon J. I., Vazquez S., Franquelo L. G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications // Proc. of the IEEE. 2017. Vol. 105, no. 11. P. 2066–2081. doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583.
21. Hybrid multilevel converter with cascaded H-bridge cells for HVDC applications: Operating principle and scalability / G. P. Adam, I. A. Abdelsalam, K. H. Ahmed, B. W. Williams // IEEE Trans. on Power Electron. 2015. Vol. 30, no. 1. P. 65–77. doi: 10.1109/TPEL.2014.2303111.
22. High power synchronous machine fed by a cascaded regenerative inverter / J. R. Rodriguez, J. Pontt, M. Perez, P. Lezana, P. W. Hammond // 2008 IEEE Industry Appl. Soc. Ann. Meeting (IAS). Edmonton, Alberta, Canada: IEEE, 2008. 7 p. doi: 10.1109/08IAS.2008.339.
23. Renge M. M., Suryawanshi H. M. Five-level diode clamped inverter to eliminate common mode voltage and reduce DV/DT in medium voltage rating induction motor drives // IEEE Trans. on Power Electron. 2008. Vol. 23, no. 4. P. 1598–1607. doi: 10.1109/TPEL.2008.925423.
24. Common-mode voltage elimination in multilevel power inverter-based motor drive applications / E. Robles, M. Fernandez, J. Zaragoza, I. Aretxabaleta, I. M. De Alegria, J. Andreu // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 2117–2139. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137892.
25. Alavi O., Hooshmand Viki A., Shamlou S. A comparative reliability study of three fundamental multilevel

inverters using two different approaches // *Electronics*. 2016. Vol. 5, no. 2. P. 18. doi: 10.3390/electronics5020018.

26. Lakhdari M., Rabhi B., Benaissa A. A new structural reconfiguration for multilevel inverters with fault tolerance capability // *Acta Polytechnica*. 2024. Vol. 64, no. 4. P. 379–384. doi: 10.1016/j.epr.2018.11.013.

27. Vinogradov A. B., Korotkov A. A. Algoritmy upravleniya vysokovoltным mnogourovnevym preobrazovatelem chastoty. Ivanovo: Izd-vo IvanGEU im. V. I. Lenina, 2018. 184 s. (In Russ.).

28. Sidorov G. S. Upravlenie mnogourovnevymi preobrazovatelnyimi chastoty na baze kaskadnogo vključenja N-mostov v avarijnyh rezhimah raboty vysokovoltного электропривода // *Mat. Vseros. Nauch.-prakt. konf. «Informacionno-telekommunikacionnye sistemy i tehnologii (ITSiT)»*. Kemerovo: Izd-vo KuzGTU im. T. F. Gorbacheva, 2025. S. 483–487. (In Russ.).

29. Hammond P. W. Enhancing the reliability of modular medium-voltage drives // *IEEE Trans. on Industrial Electron.* 2002. Vol. 49, no. 5. P. 948–954. doi: 10.1109/TIE.2002.803172.

30. Nos O. V., Dybko M. A., Nos N. I. Algoritmy upravleniya mnogourovnevym invertorom naprjazhenija s kaskadnym vključeniem H-mostov v avarijnom rezhime raboty // *Elektrotexnika*. 2021. № 12. S. 37–47. (In Russ.).

31. Lezana P., Ortiz G. Extended operation of cascade multicell converters under fault condition // *IEEE Trans. on Industrial Electron.* 2009. Vol. 56, no. 7. P. 2697–2703. doi: 10.1109/TIE.2009.2019771.

32. Jeongwoo K., Younghoon C. Improved neutral shift method for fault tolerant operation of three phase MLCI // *J. of Power Electron.* 2021. Vol. 21, no. 8. P. 49–58. doi: 10.1007/s43236-020-00161-0.

33. Siva Priya A., Kalaiarasi N. An extensive review on fault detection and fault-tolerant control of multilevel inverter with applications // *Intern. J. of Renewable Energy Research*. 2022. Vol. 12, no. 2. P. 244–261.

34. Condition monitoring for device reliability in power electronic converters: A review / S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby, L. Ran, P. Tavner // *IEEE Trans. on Power Electron.* 2010. Vol. 25, no. 11. P. 2734–2752. doi: 10.1109/TPEL.2010.2049377.

35. Pankratov V. V., Kotin D. A. Adaptivnye algoritmy bezdatchikovogo vektornogo upravlenija asinhronnymi elektroprivodami podemno-transportnyh mehanizmov: Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2018. 125 s. (In Russ.).

36. Operation of a medium-voltage drive under faulty conditions / J. Rodriguez, P. W. Hammond, J. Pontt, R. Musalem, P. Lezana, M. J. Escobar // *IEEE Trans. on Industrial Electron.* 2005. Vol. 52. № 4. P. 1080–1085. doi: 10.1109/TIE.2005.851645.

37. Eaton D., Rama J., Hammond P. Neutral shift: Five years of continuous operation with adjustable frequency Drives // *IEEE Industry Appl. Magazine*. 2003. Vol. 9, no. 6. P. 47–54. doi: 10.1109/MIA.2003.1245795.

38. Vinogradov A. B. Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka. Ivanovo: Izd-vo IvanGEU im. V. I. Lenina, 2008. 298 s. (In Russ.).

Information about the authors

Oleg V. Nos – Dr Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technological Machines Design Department, Novosibirsk State Technical University, Karl Marx ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia.

E-mail: nos@corp.nstu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5737-5354>

Georgiy S. Sidorov – junior research fellow of the Technological Excellence Center, Novosibirsk State Technical University, Karl Marx ave., 20, Novosibirsk, 630073, Russia.

E-mail: geopgiy@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; принята к публикации после рецензирования 18.03.2026; опубликована онлайн 25.05.2026.

Submitted 30.01.2026; accepted 18.03.2026; published online 25.05.2026.
