

КОРРЕКЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ПРИ ДЕФЕКТЕ СИЛОВОЙ ЯЧЕЙКИ ЕГО ИНВЕРТОРА

Для многоуровневых преобразователей частоты ПЧ [1] одним из критичных режимов является режим работы при выходе из строя силовой ячейки в одной из фаз инвертора. Байпасирование при этом силовой ячейки инвертора опасно возникновением перекоса напряжения по фазам и, как следствие, остановкой частотно-регулируемого электропривода по причине дисбаланса токов в нагрузке ПЧ [2]. Дана функциональная схема системы управления СУ ПЧ с указанием его сигналов управления и коррекции выходного напряжения ПЧ. Предлагается определение коэффициента коррекции системы управления ПЧ, позволяющего при отключении ячейки в фазе инвертора ПЧ сформировать на выходе СУ сигнал управления, обеспечивающий максимально возможные амплитуды линейных напряжений с сохранением их межфазовой симметрии для стабильной работы привода в подобном режиме. Представлены соотношения, определяющие коэффициент коррекции СУ при дефекте силовой ячейки инвертора ПЧ. На примере высоковольтного ПЧ с многоуровневым инвертором дается анализ векторной диаграммы выходного напряжения ПЧ, работающего с байпасированной ячейкой в фазе, а также при использовании предлагаемой коррекции СУ.

Ключевые слова: многоуровневый преобразователь частоты, инвертор, система управления, коэффициент коррекции, математическая модель, векторная диаграмма напряжения инвертора, дисбаланс токов.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на рынке высоковольтных преобразователей частоты широко применяются ПЧ с многоуровневым инвертором. Их особенностью является схема построения инвертора с последовательным объединением низковольтных ячеек [4], технология которых хорошо отработана в низковольтных преобразователях частоты.

В многоуровневых ПЧ для обеспечения безаварийной работы электропривода при выходе из строя силовых ячеек ПЧ в любой из фаз применяется система байпасирования ячеек. Байпасирование ячеек ПЧ может сопровождаться возникновением перекоса напряжения по фазам, дисбалансом токов и, как следствие, остановкой электропривода

Между тем для стабильной работы электродвигателя необходимо, чтобы на обмотках его статора сохранялись одинаковые по амплитуде линейные напряжения, сдвинутые относительно друг друга на угол 120 град. Фазные же напряжения при этом могут быть и асимметричны [3]. Учитывая данный факт, возможно за счет дополнительной коррекции существующей СУ ПЧ попытаться обеспечить при различном количестве отключенных секций инвертора максимально возможные амплитуды линейных напряжений с сохранением их межфазовой симметрии. Если корректирующий коэффициент СУ будет незначительно отличаться от проектного решения, то амплитуды и симметричность выходных линейных напряжений могут оказаться допустимыми. При этом переход в режим ослабления поля при некотором общем снижении напряжения может сопровождаться снижением выходной частоты, если это допустимо по технологии.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СУ ПЧ

Определение коэффициента коррекции СУ может быть продемонстрировано на примере многоуровневого ПЧ мощностью 1,6 МВт и выходным напряжением 6 кВ с шестью силовыми инверторными ячейками в каждой из фаз преобразователя. Параметры каждой силовой ячейки подобного ПЧ представлены в **таблице**.

Технические данные силовой ячейки инвертора

Наименование параметра	Значение параметра
Входной ток I_1	95 А
Входное линейное трехфазное напряжение U_{1C}	660 В
Выходной ток I_2	195 А
Номинальное выходное напряжение каждой секции инвертора $U_{н.сек}$	890 В

Функциональная схема СУ формирования фазных напряжений инвертора представлена на **рис. 1**.

Здесь:

блок 1 – вычисляет по соответствующим фазам A , B , C дополнительные коэффициенты K_{da} , K_{db} , K_{dc} коррекции длительности импульсов узла широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в зависимости от секционных напряжений промежуточных звеньев постоянного тока инвертора;

блок 2 – вычисляет вспомогательные коэффициенты K_a , K_b , K_c , определяющие значение коэффициента коррекции по тем же фазам;

блок 3 – вычисляет коэффициент коррекции K_{pro} , определяющий максимально возможное выходное напряжение инвертора при выходе из строя его ячеек;

блок 4 – вычисляет вектора нулевой последовательности O_{11} выходного напряжения инвертора;

блок 2/3 – выполняет перевод из двухфазной системы координат в трехфазную [2];

блок «+» – добавляет вектор нулевой последовательности к сигналу формирования напряжения по каждой фазе.

Входными сигналами блоков являются соответственно:

K – количество секций в фазах A , B , C соответственно;

$K_{A\ err}$, $K_{B\ err}$, $K_{C\ err}$ – количество секций, вышедших из строя в фазах;

$K_{uf} \cdot U_a(t)$, $K_{uf} \cdot U_b(t)$, $K_{uf} \cdot U_c(t)$ – сигналы формирования фазных напряжений;

U_a , U_b , U_c – фазные напряжения на выходе инвертора.

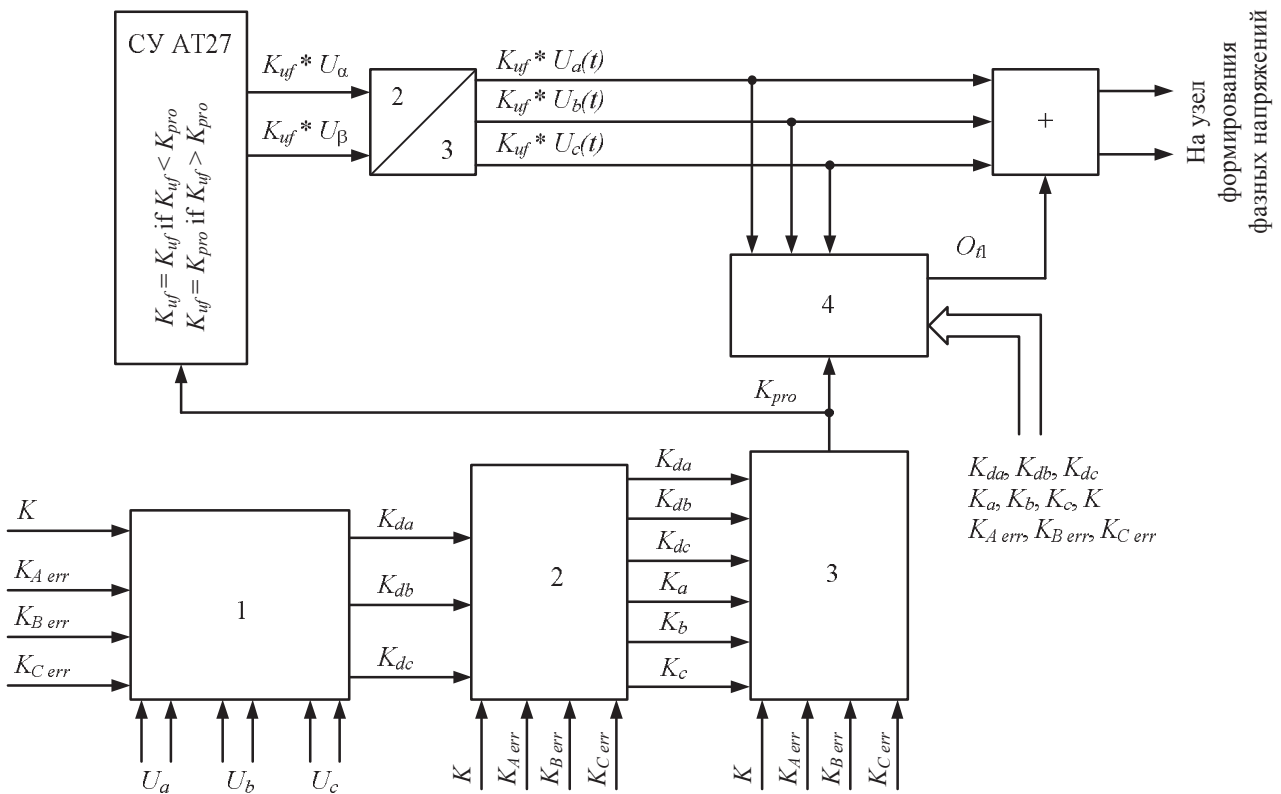


Рис. 1. Функциональная схема системы управления

В данной структуре СУ с учетом ее коррекции и вектора нулевой последовательности выходных напряжений инвертора определяет сигналы, формирующие напряжения для каждой фазы соответственно.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА
ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММ

Круговая частота питающей сети $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 314$ рад/с.

Период питающей сети $T = 1/f = 0,02$ с.

Количество секций в фазах A, B, C: $K = 6$.

Количество секций вышедших из строя фазы A ($K_{A\text{err}}$), фазы B ($K_{B\text{err}}$), фазы C ($K_{C\text{err}}$).

Количество рабочих секций в каждой фазе при исправном ПЧ:

$$A_a = K - K_{A\text{err}} = 6 \text{ (при } K_{A\text{err}} = 0);$$

$$B_b = K - K_{B\text{err}} = 6 \text{ (при } K_{B\text{err}} = 0);$$

$$C_c = K - K_{C\text{err}} = 6 \text{ (при } K_{C\text{err}} = 0).$$

Выходное трехфазное напряжение инвертора для скалярного и векторного управлений является функцией величины вращающегося вектора и анализ поведения ПЧ для обоих СУ будет идентичен. Ниже в качестве примера рассматривается скалярное управление.

При работоспособности всех секций инвертора ограничение амплитуды вращающегося вектора его выходного напряжения (переход в режим ослабления магнитного поля двигателя) определяется выходной частотой инвертора, напряжением промежуточных звеньев постоянного тока и соотношением $K_{uf} = U/f$. При этом выходные фазные напряжения ПЧ симметричны, углы сдвига между ними одинаковы, и каждая фаза может формировать напряжение одинаковой амплитуды. При появлении в какой-либо из фаз (нескольких фазах) инвертора ПЧ неисправности и включении его байпасных звеньев основным ограничением формирования амплитуды напряжения является

уменьшение общего выходного напряжения, связанного с отключением части напряжения байпасными звеньями. При этом результирующее сформированное напряжение инвертора уменьшается на количество включенных «байпасов» и превысить это напряжение не представляется возможным. В то же время желательно полностью использовать возможности фаз с байпасными секциями за счет коррекции СУ, при которой можно получить максимально возможное напряжение на выходе ПЧ.

Все предварительные вычисления для определения коэффициента коррекции СУ целесообразно проводить в двухфазной симметричной системе координат. При этом для нормально работающих секций напряжение U_d каждой фазы, входящее в расчетные соотношения, является суммой всех секционных напряжений.

Естественно, должны быть учтены только напряжения используемых секций (исключены напряжения «байпасных» секций). Для простоты анализа предполагается отключение одной из секций. Для определения коэффициента коррекции K_{pro} целесообразно предварительно нормировать коэффициенты K_{da} , K_{db} , K_{dc} как:

$$K_{da} = \frac{U_a}{A_a \cdot U_{н.сек}};$$

$$K_{db} = \frac{U_b}{B_b \cdot U_{н.сек}};$$

$$K_{dc} = \frac{U_c}{C_c \cdot U_{н.сек}};$$

$$K_{da} = K_{db} = K_{dc} = 1,004,$$

где $A_a \cdot U_{н.сек} = B_b \cdot U_{н.сек} = C_c \cdot U_{н.сек} = 5,340 \cdot 10^3$ В – соответственно номинальные напряжения фаз A, B, C инвертора; $U_a = U_b = U_c = 5,361 \cdot 10^3$ В – фазные напряжения на выходе инвертора, найденные методом итерации.

Для определения предельного коэффициента коррекции выходного напряжения при включении «байпасов» в различных фазах при разном их количестве, а также при вынужденном уменьшении какого-либо вектора напряжения при определенных соотношениях включенных «байпасов» в разных фазах полезно воспользоваться их векторной диаграммой. Для простоты расчетов начальный поиск коэффициентов коррекции для каждой из фаз может производиться в треугольнике относительных линейных напряжений векторной диаграммы с координатами (x_0, y_0) точки смещения нейтрали в ортогональной системе координат (рис. 2).

ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЛИНЕЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ БАЙПАСНЫХ СЕКЦИЙ

Векторная диаграмма фазных напряжений, вписанная в единичный треугольник линейных напряжений с точкой с заданными координатами $X_0=0,7$ и $Y_0=0,3$, представлена на рис. 2.

Здесь $U_a(x), U_b(x), U_c(x)$ – фазные напряжения соответственно фаз A, B, C , вписанные в единичный треугольник;

$Y_0(x)$ – вектор нулевой последовательности напряжений.

При определении коэффициента коррекции примем коэффициенты $K_a = K_b = K_c = 1$, а количество байпасных секций в каждой фазе соответственно $K_{A\text{ err}} = K_{B\text{ err}} = K_{C\text{ err}} = 0$.

Определение коэффициента коррекции K_{pro} достаточно объемно, поэтому ниже при равенстве количества исправных секций в каждой фазе, одинаковых дополнительных коэффициентах по напряжению в промежуточных звеньях постоянного тока питания ячеек инвертора, представлены итоговые соотношения его вычисления

$$K_{pro} = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot K} \cdot \sqrt{A_1}, \text{ если } A_2 - A_3 = 0.$$

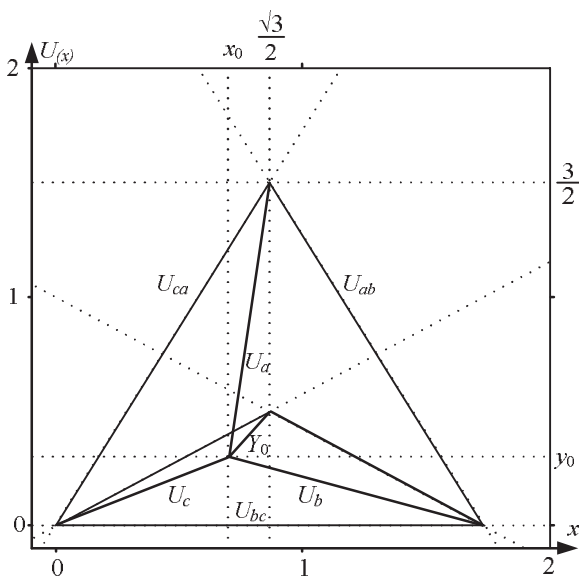


Рис. 2. Исходная векторная диаграмма напряжений

Иначе

$$K_{pro} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{K} \sqrt{\frac{A_2 - A_3}{A_1 - \sqrt{3} \cdot \sqrt{2 \cdot A_3 - A_2}}} \right).$$

Здесь:

$$A_1 = (K_A \cdot K_{da} \cdot A_a)^2 + (K_B \cdot K_{db} \cdot B_b)^2 + (K_C \cdot K_{dc} \cdot C_c)^2;$$

$$A_2 = (K_A \cdot K_{da} \cdot A_a)^4 + (K_B \cdot K_{db} \cdot B_b)^4 + (K_C \cdot K_{dc} \cdot C_c)^4;$$

$$A_3 = \left[(K_A \cdot K_{da} \cdot A_a)^2 \cdot (K_B \cdot K_{db} \cdot B_b)^2 + \right.$$

$$\left. + (K_A \cdot K_{da} \cdot A_a)^2 \cdot (K_C \cdot K_{dc} \cdot C_c)^2 + \right.$$

$$\left. + (K_B \cdot K_{db} \cdot B_b)^2 \cdot (K_C \cdot K_{dc} \cdot C_c)^2 \right].$$

При определенных соотношениях количества работающих секций подкоренное выражение функции определения K_{pro} может быть отрицательным, и K_{pro} становится комплексным числом. Физически это означает, что условие полного использования всех рабочих ячеек инвертора, т.е. получение в каждой фазе максимально возможного напряжения, становится невыполнимым. В этом случае необходимо уменьшить выходное напряжение той фазы, у которой наибольшее количество рабочих ячеек.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ИНВЕРТОРА ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ ФАЗНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ С УЧЕТОМ K_{pro}

Пусть количество вышедших из строя ячеек в каждой фазе

$$K_{A\text{ err}} = K_{B\text{ err}} = K_{C\text{ err}} = 0,$$

тогда количество рабочих ячеек в каждой фазе: $A_a=6; B_b=6; C_c=6$.

При этом коэффициент коррекции будет равным $K_{pro}=1,0$ и смещение нулевой точки с учетом коэффициента коррекции определится как $x_0 \cdot K_{pro} = 0,868; y_0 \cdot K_{pro} = 0,501$ (расчет координат (x_0, y_0) точки смещения нейтрали достаточно объемный и в данной статье не представлен).

По векторной диаграмме на рис. 3 видно, что при шести рабочих секциях в каждой фазе диаграмма напряжений полностью симметрична, т.е. все напряжения на нагрузке симметричны и смещение нулевой точки не требуется.

Фазные и линейные напряжения инвертора с учетом смещения нулевой точки (при шести рабочих модулях в каждой фазе) представлены на рис. 4.

Анализ работы инвертора при выходе из строя одной секции в фазе A (с учетом K_{pro}).

Пусть количество вышедших из строя ячеек в каждой фазе

$$K_{A\text{ err}} = 1; K_{B\text{ err}} = K_{C\text{ err}} = 0,$$

тогда количество рабочих ячеек в каждой фазе

$$A_a = 5; B_b = 6; C_c = 6.$$

При этом коэффициент коррекции будет равным $K_{pro} = 0,942$ и смещение нулевой точки с учетом коэффициента коррекции определится как

$$x_0 \cdot K_{pro} = 0,816; y_0 \cdot K_{pro} = 0,582.$$

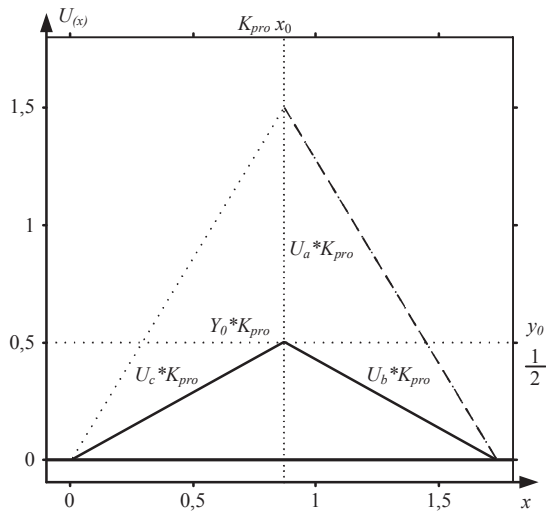


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений при работе всех секций инвертора с учетом K_{pro}

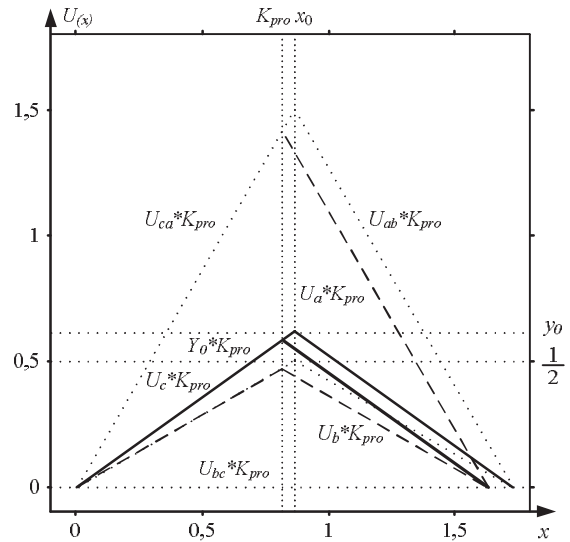


Рис. 5. Векторная диаграмма напряжений инвертора с учетом K_{pro} при выходе из строя одной его ячейки в фазе A

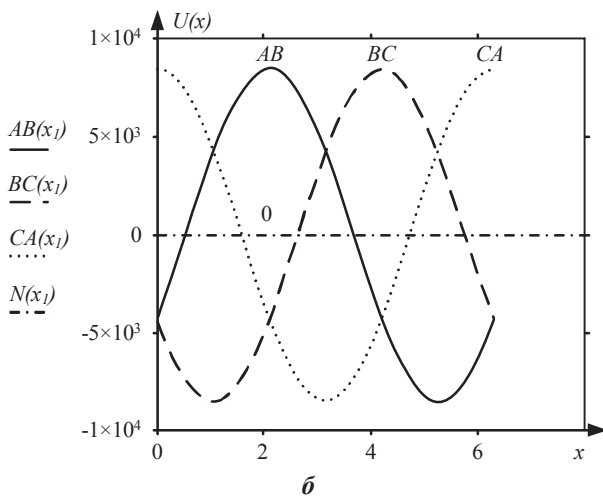
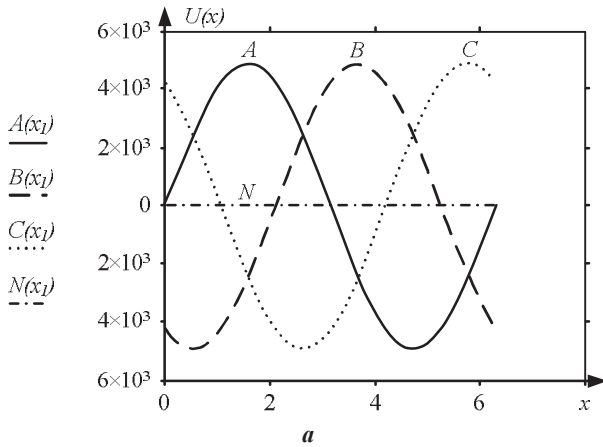


Рис. 4. Фазные (а) и линейные (б) напряжения инвертора при симметричных фазных напряжениях

При выходе из строя в фазе A одной силовой ячейки, которая автоматически байпасируется, преобразователь частоты начинает работать с 5 ячейками в одной фазе.

По векторной диаграмме рис. 5 видно, что для исключения дисбаланса токов в фазах система управления ПЧ должна смещать значение нулевой точки так, чтобы линейные напряжения оставались симметричными. Координаты нулевой точки при этом изменяются с учетом коэффициента коррекции K_{pro} .

Фазные и линейные напряжения инвертора с учетом смещения нулевой точки (при выходе из строя одной ячейки в фазе A) представлены на рис. 6, из которого видно, что при выходе из строя одной ячейки инвертора (фазы A) для обеспечения симметричности линейных напряжений происходит смещение нуля в векторной диаграмме за счет воздействия коэффициента коррекции.

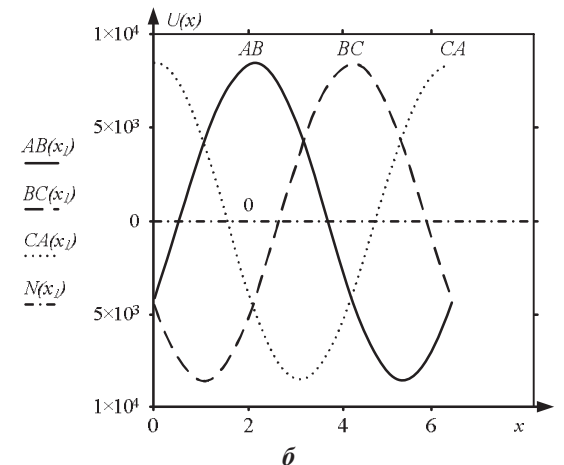
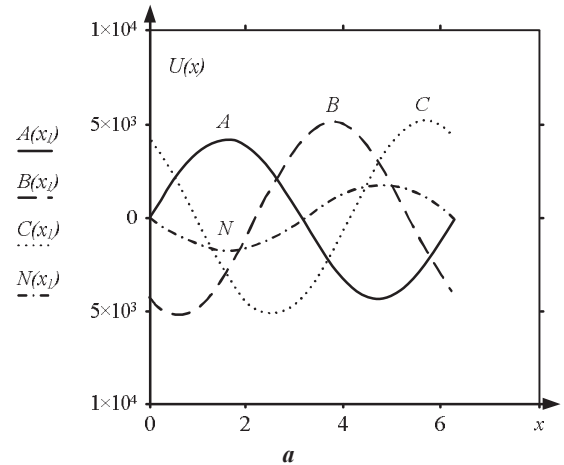


Рис. 6. Фазные (а) и линейные (б) напряжения инвертора при выходе из строя одной его ячейки в фазе A

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выходе из строя силовых ячеек инвертора ПЧ возможно за счет коррекции его СУ, влияющей на смещение нулевой точки выходных фазных напряжений инвертора, обеспечить симметричность его выходных линейных напряжений. Это реализуется путем вычисления и внесения в программную часть СУ коэффициента коррекции K_{pro} , определяемого по представленному выше соотношению. Так, для многоуровневого высоковольтного ПЧ с выходным напряжением 6 кВ с шестью силовыми инверторными ячейками в каждой из фаз преобразователя, при выходе из строя, например, одной ячейки в фазе A , вычисленный коэффициент коррекции СУ может меняться с 1 до 0,942. В

итоге, в соответствии с приведенными векторными диаграммами линейных напряжений ПЧ сохраняется их симметричность, что позволяет продолжать работу ПЧ в штатном режиме.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2015. 373 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1998. 704 с.
3. Токарев Б.В. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1990. 624 с.
4. Руководство по работе с приводами серии RobiconPerfectHarmony. USA. ASIRobicon. 2001. 205 с.

Поступила в редакцию 21 апреля 2018г.

INFORMATION IN ENGLISH

CORRECTION OF THE CONTROL SYSTEM OF A MULTILEVEL CONVERTER WITH A DEFECT IN THE POWER CELL OF ITS INVERTER

Anton P. Puchkov

Postgraduate student, Department of Automated Electric Drive, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: An_ton_p@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1298-8039>.

Oleg I. Osipov

D.Sc.(Eng.), Professor, Department of Automated Electric Drive, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia. E-mail: osipovoi2015@yandex.ru.

For multilevel frequency converters FC [1], one of the critical modes is the operating mode when the power cell fails in one of the phases of the inverter. Bypassing of the inverter power cell in this case is dangerous due to the possibility of occurrence of voltage distortion in the phases and, consequentially, the stop of the variable-frequency electric drive due to the current imbalance in the FC load [2]. A flowchart of the FC control system CS is provided, indicating its control signals and correction of the FC output voltage. It is proposed to determine the correction factor of the FC control system, which, in case of the cell failure in the phase of the FC inverter, allows generation of a control signal at the CS output that provides the maximum possible amplitudes of the line voltages while maintaining their interphase symmetry to ensure stable operation of the drive in such mode. The equations determining the CS correction factor in case of a defect in the FC inverter power cell are presented. The analysis of the vector diagram of the output voltage of the FC operating with the bypassed cell in phase, as well as with

application of the proposed CS correction, is given on the example of a high-voltage FC with a multilevel inverter.

Keywords: multilevel frequency converter, inverter, control system, correction factor, mathematical model, vector diagram of inverter voltage, current imbalance.

REFERENCES

1. Anuchin A. S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* [Electric drive control systems]: textbook for high schools. Moscow: Moscow Power Engineering Institute, 2015. 373 p.
2. Klyuchev V. I. *Teoriya elektroprivoda* [Electric drive theory]. Moscow: Energoatomizdat, 1998. 704 p.
3. Tokarev B. V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 624 p.
4. Operation Manual for RobiconPerfectHarmony Series Drives. USA. ASIRobicon. 2001. 205 p.

Пучков А.А., Осипов О.И. Коррекция системы управления многоуровневого преобразователя частоты при дефекте силовой ячейки его инвертора // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 3(40). С. 42-46. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-42-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-42-46)

Puchkov A.P., Osipov O.I. Correction of the Control System of a Multilevel Converter with a Defect in the Power Cell of its Inverter. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 42-46. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-42-46](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-42-46)