

Power Balanced Adjustment of Quad-Inverter Installation with Modified Discontinuous PWM

Oleschuk V., Ermuratskii V.

Institute of Power Engineering of Moldova
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. Purpose of this work is in the development and modification of control scheme and of basic algorithms of discontinuous space-vector modulation for synchronous and balanced regulation of multi-inverter topology of six-phase open-end winding installation with four insulated dc sources. This purpose has been achieved due to including in the control and modulation scheme of specialized control correlations connecting coefficients of modulation of inverters, required power ratio between dc-links, and voltages of the corresponding dc sources. So, basic novelty of this research is in the fact, that the elaborated and investigated control and modulation algorithms for installation on the base of inverters with discontinuous space-vector modulation (with both 30° -non-switching intervals and 60° -non-switching intervals) insure both required power sharing capability between dc links and advanced harmonic composition (without even harmonics and subharmonics) of spectra of the phase and line voltages of six-phase installation. Mutual comparison of behavior of system with two basic schemes of modified discontinuous pulsewidth modulation (PWM) has been executed. Investigation of harmonic composition of the phase voltage of multi-inverter system illustrates an important fact, that for the all analyzed control modes, connected with balanced adjustment of drive under different conditions, phase voltage of installation has symmetry for any control regimes, including control modes with fractional frequency ratios between switching frequency of converters and fundamental frequency of installation, with absence in its spectra of undesirable subharmonics. Factor of minimization of subharmonics in spectra of voltage and current of ac drives of different topologies is especially important for the medium-voltage medium-power installations on the basis of PWM converters.

Keywords: voltage source inverter, induction motor, modulation strategy, voltage spectra, integral harmonic composition.

DOI: 10.5281/zenodo.3239206

Reglarea sincronă echilibrată a instalației cu patru invertoare cu algoritmi PWM intermitenți modificați Olesciuk V., Ermuratschi V.

Institutul de Energetică al Republicii Moldova, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Scopul acestei lucrări este de a modifica schema de comandă, precum și algoritmi de bază de modulare vector intermitent pentru reglarea multiinvertoare sincronă și balansată (cu patru surse de alimentare independente) având șase topologia acționării electrice cu șase faze cu înfășurări deschise ale motorului asincron. A fost realizată modificarea corespunzătoare a circuitului de bază de modulare intermitentă (datorită includerii în circuit a parametrilor și variabilelor suplimentare) pentru două versiuni de modulare vectorială intermitentă a duratei impulsului (PWM), cu intervale de 30° și 60° de grade neconductive a cheilor electronice a invertoarelor sistemului asigurând atât echilibrul de putere necesar între sursele de alimentare, cât și simetria continuă a formelor tensiunii de ieșire ale ambelor invertoare individuale și ale tensiunilor de fază și de linie ale sistemului cu șase faze. În același timp, asigurarea echilibrului energetic necesar între sursele de alimentare se realizează pe baza dependențelor funcționale specializate care conectează factorii de modulație ai invertoarelor individuale cu amplitudinile tensiunilor de alimentare. A fost efectuată o analiză comparativă a compoziției spectrale a tensiunilor de bază în sistem cu două tipuri de modulație intermitentă prin durată de impuls. Rezultatele cercetării compoziției armonice a tensiunilor din sistemul analizat cu multe invertoare a au confirmat faptul, că pentru toate regimurile de funcționare a sistemului de convertizare cu șase faze, formele de bază a tensiunii posedă un sfert de simetrie, inclusiv pentru regimurile de control cu raportul fracționar între frecvența de lucru a cheilor electronice a și frecvența de ieșire a sistemului, dar și în zona de frecvențe mari de ieșire (în zona de supra-modulare).

Cuvinte-cheie: invertoare de tensiune, motor electric asincron, strategie de control și modulare, compoziție spectrală de tensiune.

**Сбалансированное синхронное регулирование четырехинверторной установки с модифицированными алгоритмами прерывистой ШИМ
Олещук В.И., Ермуратский В.В.**

Институт энергетики Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Целью данной работы является модификация базовых алгоритмов управления и прерывистой синхронной модуляции векторного типа для синхронного и сбалансированного регулирования многоинверторной (с четырьмя автономными источниками питания) топологии системы шестифазного электропривода с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя. Данная цель - сбалансированное регулирование системы (обеспечение требуемого баланса мощностей между источниками электропитания) - достигается за счет включения в схему управления и модуляции специализированных функциональных зависимостей, связывающих коэффициенты модуляции отдельных инверторов с амплитудами напряжений источников питания. Новизна исследования состоит в том, что разработанные законы и алгоритмы управления и синхронной прерывистой модуляции с 30-градусными и 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей инверторов обеспечивают как требуемый баланс мощностей между источниками питания, так и непрерывную симметрию форм выходного напряжения, как отдельных инверторов, так и фазного и линейного напряжений шестифазной системы, при любых условиях функционирования. Выполнено моделирование процессов в системе с четырьмя базовыми режимами работы, проведен сопоставительный анализ спектрального состава фазовых напряжений в системе. Результаты исследования гармонического состава напряжений в анализируемой многоинверторной системе подтвердили тот факт, что для всех анализируемых режимов работы шестифазной преобразовательной системы кривые фазового напряжения обладают четвертьволновой симметрией (в спектрах напряжения при этом отсутствуют четные гармоники и субгармоники), в том числе при режимах управления с дробным соотношением между частотой коммутации вентилей инверторов и выходной частотой системы, что является особенно важным для систем электропривода средней и большой мощности. Для многоинверторных преобразовательных систем повышенной мощности одной из важных проблем является обеспечение синхронного функционирования всех инверторов системы, с реализацией при этом симметричных форм фазного линейного напряжений на всем диапазоне регулирования.

Ключевые слова: инвертор напряжения, асинхронный электродвигатель, стратегия управления и модуляции, спектральный состав напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Энергосберегающие системы и установки регулируемого (автоматизированного) электропривода переменного тока на базе силовых преобразователей параметров электрической энергии являются одними из наиболее используемых электротехнических устройств в промышленности, в коммунальном хозяйстве, и в электрифицированном транспорте.

Основные технические характеристики систем электропривода, регулируемых на базе силовых преобразователей, в значительной степени зависят как от используемых в преобразователях для электропривода принципов управления, так и от схем и алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), применяемых в системах. Модификация базовых методов и способов импульсной модуляции для новых перспективных топологий преобразовательных систем для регулируемого электропривода является поэтому актуальной задачей в области силовой электроники [1-5].

Многофазные и многоинверторные преобразовательные системы привлекают в последнее время все больше внимания со стороны исследователей и разработчиков. Одной

из перспективных топологий преобразовательных систем для электропривода средней и повышенной мощности является при этом многоинверторная шестифазная преобразовательная система с несколькими автономными источниками электропитания постоянного тока, в которой выходы отдельных инверторов подключены к разомкнутым статорным обмоткам шестифазного электродвигателя [6-10]. Преобразователи для систем регулируемого электропривода средней и большой мощности характеризуются относительно низкими частотами переключения силовых вентилей. Для многоинверторных преобразовательных систем повышенной мощности одной из важных проблем является обеспечение синхронного функционирования всех инверторов системы, с реализацией при этом симметричных форм фазного линейного напряжений на всем диапазоне регулирования. Также, для систем с несколькими автономными источниками питания необходимо обеспечить требуемое распределение мощностей между отдельными источниками.

Стандартные схемы векторной модуляции, являющейся одним из популярных видов

модуляции для систем регулируемого электропривода, характеризуются асинхронным характером модуляционных процессов в системах, что приводит к асимметричным формам выходного напряжения инверторов, с появлением в спектрах выходных напряжений нежелательных субгармоник (основной частоты) [11-12]. Для коррекции гармонического состава напряжений и токов в системах на базе инверторов напряжения с пониженными частотами коммутации силовых ключей, разработаны алгоритмы синхронной векторной модуляции, базирующиеся на стандартной методике расчета параметров управляющих сигналов [13-15]. Вместе с тем, стандартные способы и схемы синхронной векторной модуляции в большинстве своем не позволяют обеспечить эффективную синхронизацию напряжений в преобразовательных системах в случае нестандартных или дробных соотношений между частотой переключения силовых ключей и выходной частотой системы.

С целью преодоления вышеупомянутых недостатков стандартных способов синхронной модуляции, разработаны более универсальные схемы и алгоритмы синхронной векторной модуляции применительно к преобразователям для электропривода переменного тока, а также к фотопреобразовательным системам [16-20].

В связи с этим целью данной работы является модификация базовых алгоритмов управления и модуляции для обеспечения на всем диапазоне управления синхронного и требуемого сбалансированного (применительно к автономным источникам питания) регулирования многоинверторной системы шестифазного электропривода с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя.

I. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА БАЗЕ ЧЕТЫРЁХ ИНВЕРТОРОВ

Одной из перспективных топологий преобразовательных систем для регулируемого электропривода повышенной мощности является приведенная на рис. 1 система шестифазного электропривода с разомкнутыми обмотками асимметричного асинхронного электродвигателя, содержащая два комплекта обмоток, пространственно

сдвинутых на 30 электрических градусов одна относительно другой. В систему электропитания двигателя при этом входят четыре источника постоянного тока и четыре инвертора напряжения (INV1 – INV4) [6-8].

Фазовые напряжения V_{as} и V_{xs} первой и второй инверторных групп системы с четырьмя источниками питания (рис. 1) определяются в соответствии с (1)-(4) [9].

$$V_{01} = 1/3(V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} + V_{a2} + V_{b2} + V_{c2}) \quad (1)$$

$$V_{as} = V_{a1} + V_{a2} - V_{01} \quad (2)$$

$$V_{02} = 1/3(V_{x1} + V_{y1} + V_{z1} + V_{x2} + V_{y2} + V_{z2}) \quad (3)$$

$$V_{xs} = V_{x1} + V_{x2} - V_{02} \quad (4)$$

где $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}, V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}$ и $V_{x1}, V_{y1}, V_{z1}, V_{x2}, V_{y2}, V_{z2}$ – соответствующие полярные напряжения каждой инверторной секции, V_{01} и V_{02} – соответствующие напряжения нулевой последовательности первой и второй инверторных групп.

II. СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА СИНХРОННОЙ ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Базовые свойства и особенности методологии синхронной векторной модуляции описаны в обзорной публикации [19]. При этом подчеркивается, что алгоритмы синхронной векторной широтно-импульсной модуляции позволяют обеспечить на всем диапазоне управления и регулирования симметрию форм фазного и линейного напряжения как трехфазных, так и многофазных, многоинверторных, и каскадных преобразовательных систем при различных законах управления и регулирования [19].

III. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО БАЛАНСА МОЩНОСТЕЙ МЕЖДУ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

В случае неодинаковых амплитуд напряжений источников постоянного тока анализируемой четырехинверторной системы если $V_{dc1} \neq V_{dc2}$, и $V_{dc3} \neq V_{dc4}$, а $V_{dc1} = V_{dc3}$

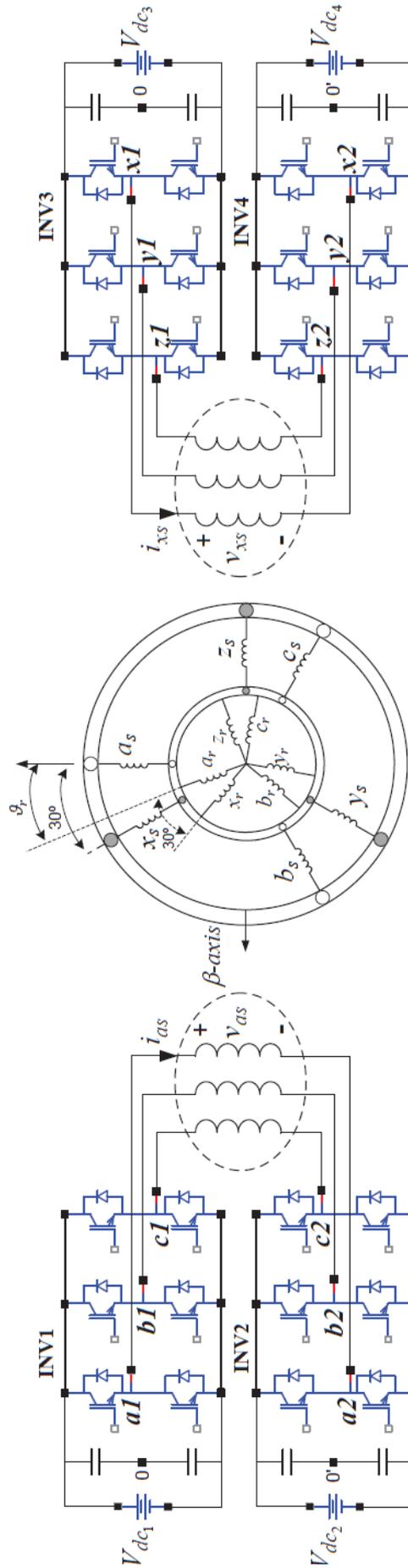


Рис. 1. Шестифазный электропривод с разомкнутыми обмотками асимметричного асинхронного электродвигателя, и с двумя инверторными секциями по два инвертора в каждой (INV1+INV2, питающиеся от источников V_{dc1} и V_{dc2} , и INV3+INV4, питающиеся от источников V_{dc3} и V_{dc4}).
 Fig. 1. Six-phase system with open-end winding of induction motor with two inverter sections (INV1+INV2 supplied by V_{dc1} and V_{dc2} ; INV3+INV4, supplied by V_{dc3} and V_{dc4}).

и $V_{dc2} = V_{dc4}$, для обеспечения эквивалентности амплитуд выходного напряжения (а также соответствующего баланса мощностей) двух инверторов каждой инверторной группы в процессе скалярного регулирования системы по закону $V/F = const$, необходимо обеспечить нижеследующие функциональные зависимости между коэффициентами модуляции инверторов m_1, m_2, m_3 , и m_4 , и амплитудами напряжений соответствующих источников питания:

$$m_1 V_{dc1} = m_2 V_{dc2} \quad (5)$$

$$m_3 V_{dc3} = m_4 V_{dc4} \quad (6)$$

Для шестифазной преобразовательной системы на базе четырёх инверторов с синхронной векторной ШИМ, питающихся от четырех источников постоянного тока с разными питающими напряжениями, для осуществления требуемого распределения мощностей P_1/P_2 и P_3/P_4 между четырьмя источниками двух инверторных секций необходимо обеспечить реализацию соотношений (7)-(8), связывающих между собой амплитуды напряжений источников постоянного тока, коэффициенты модуляции четырех инверторов, а также требуемое распределение мощностей между источниками:

$$\frac{m_1 V_{dc1}}{m_2 V_{dc2}} = \frac{P_1}{P_2} \quad (7)$$

$$\frac{m_3 V_{dc3}}{m_4 V_{dc4}} = \frac{P_3}{P_4} \quad (8)$$

Также, для анализируемой системы с расщепленными обмотками шестифазного электродвигателя необходимо обеспечить равное распределение мощностей между двумя инверторными группами:

$$P_1 + P_2 = P_3 + P_4 \quad (9)$$

Таким образом, с учетом соотношений (7)-(8), для сбалансированного регулирования шестифазной системы с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя на всем диапазоне регулирования

необходимо обеспечить выполнение функционального соотношения (10):

$$m_1 V_{dc1} P_2 + m_2 V_{dc2} P_1 = m_3 V_{dc3} P_4 + m_4 V_{dc4} P_3, \quad (10)$$

где относительные мощности каждого инвертора P_1-P_4 (и каждого соответствующего источника питания) выражаются как относительные величины общей (суммарной) мощности шестифазной установки.

IV. СБАЛАНСИРОВАННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ШЕСТИФАЗНОЙ СИСТЕМЫ С СИНХРОННОЙ ШИМ

Четыре базовых режима регулирования и управления были выбраны для сопоставительного анализа работы сбалансированной шестифазной системы на базе четырёх инверторов (Таблица 1, **Режимы 1-4**). При этом анализировались режимы работы устройства с двумя разновидностями прерывистой синхронной модуляции: а) прерывистая модуляция с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентиля (DPWM30), и б) прерывистая модуляция с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентиля (DPWM60) [19-20].

Принято также, что для инвертора **INV4** (рис. 1) питающее напряжение имеет максимальную относительную величину $V_{dc4} = I$, а относительные величины напряжения других источников равны или меньше напряжения V_{dc4} . Коэффициенты модуляции инверторов m_1-m_4 , обеспечивающие требуемый баланс мощностей в системе, определяются при этом в соответствии с (7)-(10).

В частности, известно, что для большинства преобразовательных устройств для регулируемого электропривода переменного тока алгоритмы прерывистой модуляции обеспечивают (при равенстве средней частоты коммутации вентиля инверторов) лучший спектральный состав выходного напряжения инверторов в зоне повышенных выходных частот, а при пониженных значениях выходных частот (и при пониженных значениях коэффициентов модуляции инверторов) лучшие спектральные характеристики выходного напряжения инверторов обеспечиваются при использовании схем и алгоритмов непрерывной векторной широтно-импульсной модуляции [9,19].

Таблица 1

Базовые режимы функционирования шестифазной сбалансированной системы

Table 1

Basic control regimes of balanced six-phase installation

Режим Regime	P1	P2	P3	P4	$\frac{V_{dc}}{m}$	INV1	INV2	INV3	INV4
1	0.25	0.25	0.25	0.25	$\frac{V_{dc}}{m}$	1 0.7	1 0.7	1 0.7	1 0.7
2	0.25	0.25	0.2	0.3	$\frac{V_{dc}}{m}$	1 0.7	1 0.7	1 0.56	1 0.84
3	0.22	0.28	0.18	0.32	$\frac{V_{dc}}{m}$	1 0.62	1 0.78	1 0.5	1 0.9
4	0.23	0.27	0.24	0.26	$\frac{V_{dc}}{m}$	0.75 0.93	0.9 0.78	0.8 0.87	1 0.7

Принято, что для всех анализируемых режимов работы выходная частота системы равна $F=35\text{Гц}$, при этом средняя частота коммутации силовых ключей (вентилей) всех инверторов установки равна 1КГц .

На рис. 2 – рис. 13 представлены результаты моделирования процессов в шестифазной системе на базе четырех инверторов, регулируемых при помощи алгоритмов прерывистой синхронной модуляции при условии обеспечения требуемого баланса мощностей между автономными источниками электропитания (Режим 1, а также Режимы 3-4 из Таблицы 1).

В частности, на рис. 2 – рис. 13 представлены (в относительных величинах) формы базовых напряжений в системе (рис. 1) на периоде выходной частоты, а также спектральные характеристики фазовых (V_{as} и V_{xs}) и линейных (V_{alb1} , V_{a2b2} , V_{x1y1} , V_{x2y2}) напряжений.

Анализ представленных на рис. 2-13 кривых базовых напряжений и их спектрограмм подтверждает факт синхронизации напряжений и минимизации величины субгармоник в сбалансированной шестифазной системе с двумя версиями прерывистой синхронной модуляции при различных режимах функционирования.

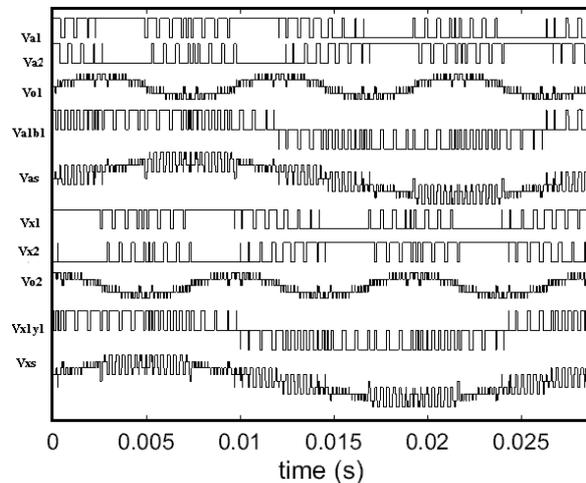


Рис. 2. Базовые напряжения в системе (Режим 1, DPWM30, $P_1=P_2=P_3=P_4=0.25$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$).

Fig. 2. Basic voltages of six-phase installation (Regime 1, DPWM30, $P_1=P_2=P_3=P_4=0.25$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$).

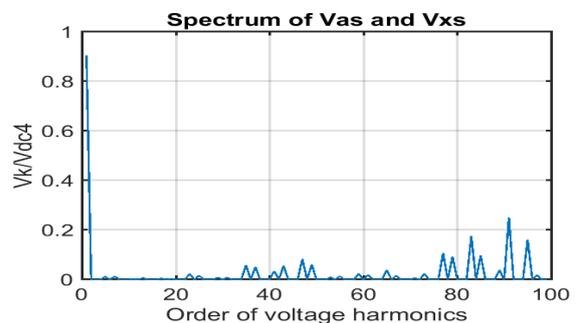


Рис.3. Спектр напряжений (Режим 1, DPWM30).

Fig. 3. Voltage spectrum (Regime 1, DPWM30).

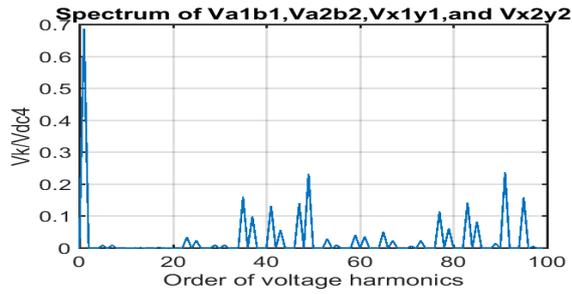


Рис.4. Спектр напряжений (Режим 1, DPWM30).
Fig.4. Voltage spectrum (Regime 1, DPWM30).

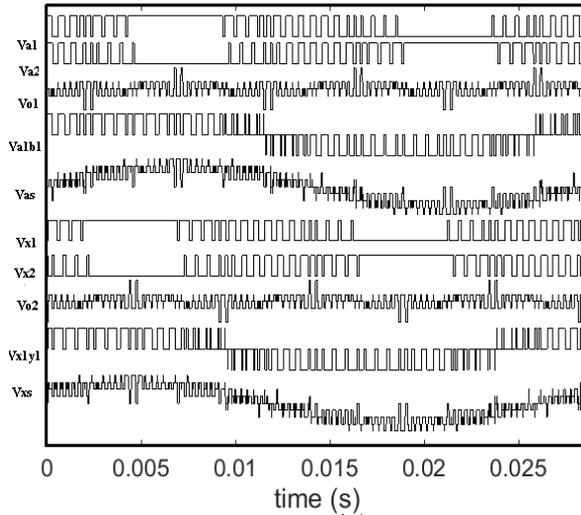


Рис. 5. Базовые напряжения в системе (Режим 1, DPWM60, $P_1=P_2=P_3=P_4=0.25$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$).
Fig. 5. Basic voltages of installation (Regime 1, DPWM60, $P_1=P_2=P_3=P_4=0.25$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.7$).

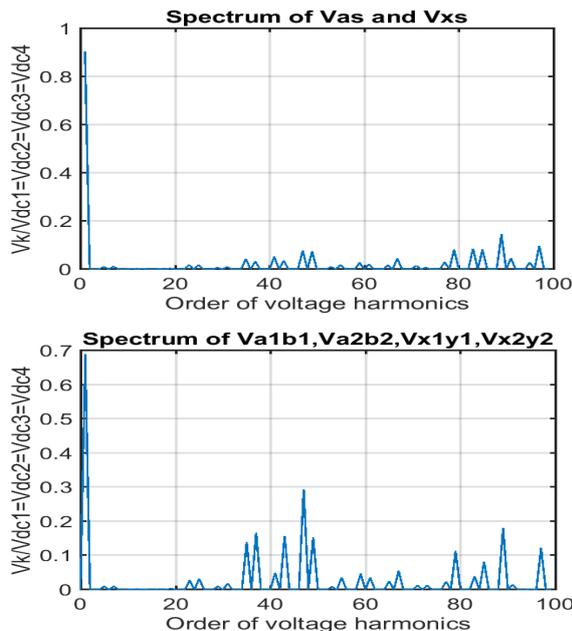


Рис. 6. Спектры напряжений (Режим 1, DPWM60).
Fig. 6. Voltage spectra (Regime 1, DPWM60).

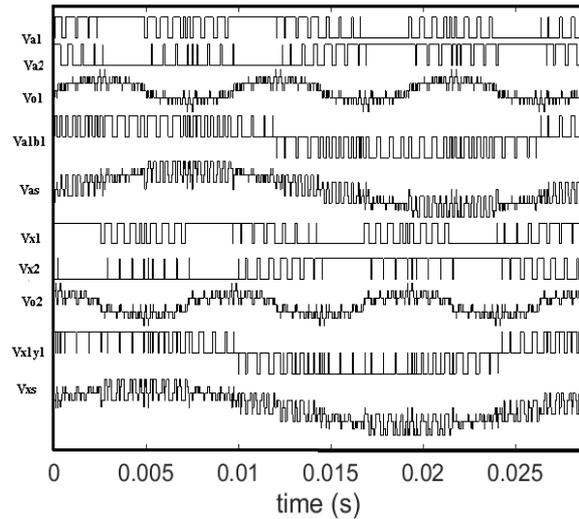


Рис. 7. Базовые напряжения в системе (Режим 3, DPWM30, $P_1=0.22$, $P_2=0.28$, $P_3=0.18$, $P_4=0.32$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=0.62$, $m_2=0.78$, $m_3=0.50$, $m_4=0.90$).
Fig. 7. Basic voltages of installation (Regime 3, DPWM30, $P_1=0.22$, $P_2=0.28$, $P_3=0.18$, $P_4=0.32$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=0.62$, $m_2=0.78$, $m_3=0.50$, $m_4=0.90$).

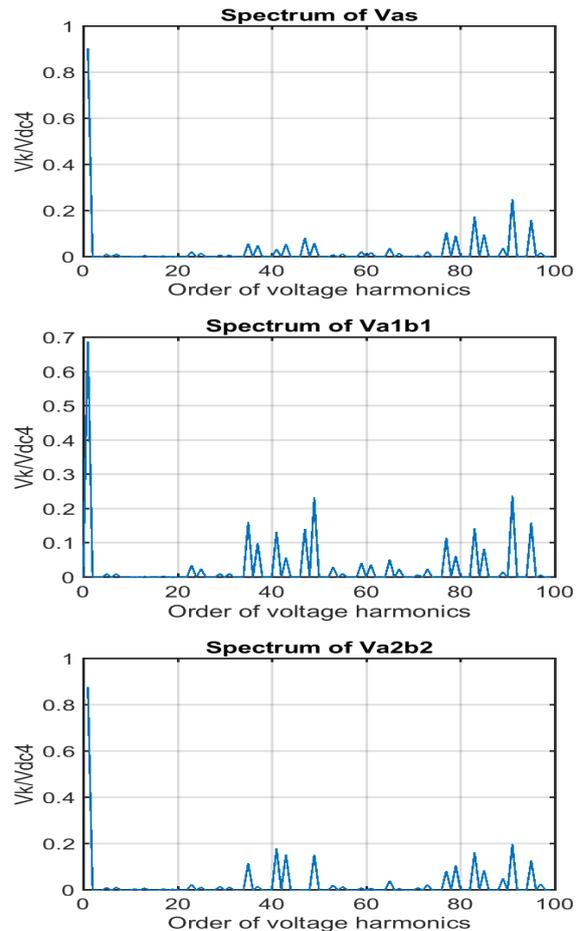


Рис. 8. Спектры напряжений (Режим 3, DPWM30).
Fig. 8. Voltage spectra (Regime 3, DPWM30).

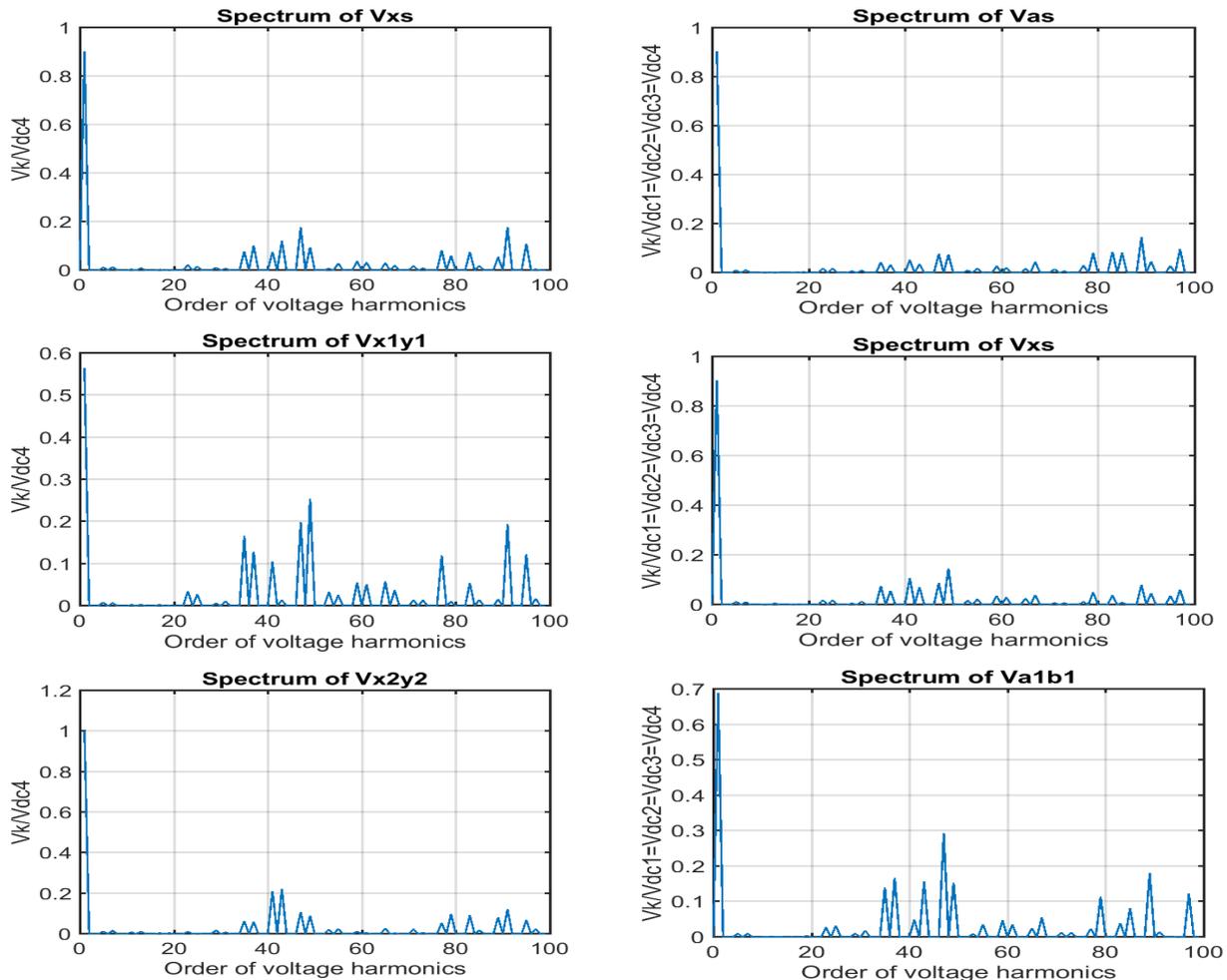


Рис. 9. Спектры напряжений (Режим 3, DPWM30).
 Fig. 9. Voltage spectra (Regime 3, DPWM30).

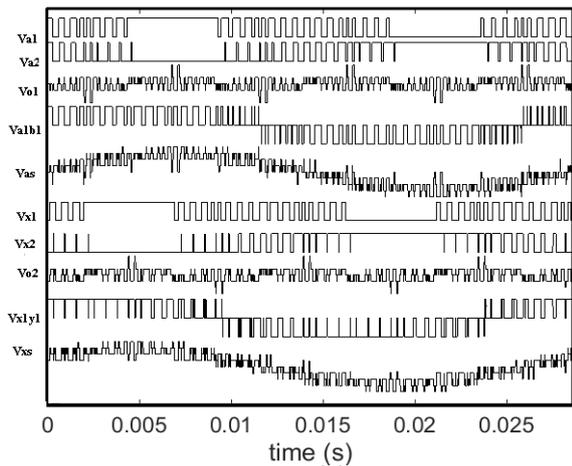


Рис. 10. Базовые напряжения в системе (Режим 3, DPWM60, $P_1=0.22$, $P_2=0.28$, $P_3=0.18$, $P_4=0.32$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=0.62$, $m_2=0.78$, $m_3=0.50$, $m_4=0.90$).
 Fig. 10. Basic voltages of installation (Regime 3, DPWM60, $P_1=0.22$, $P_2=0.28$, $P_3=0.18$, $P_4=0.32$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}=1$, $m_1=0.62$, $m_2=0.78$, $m_3=0.50$, $m_4=0.90$).

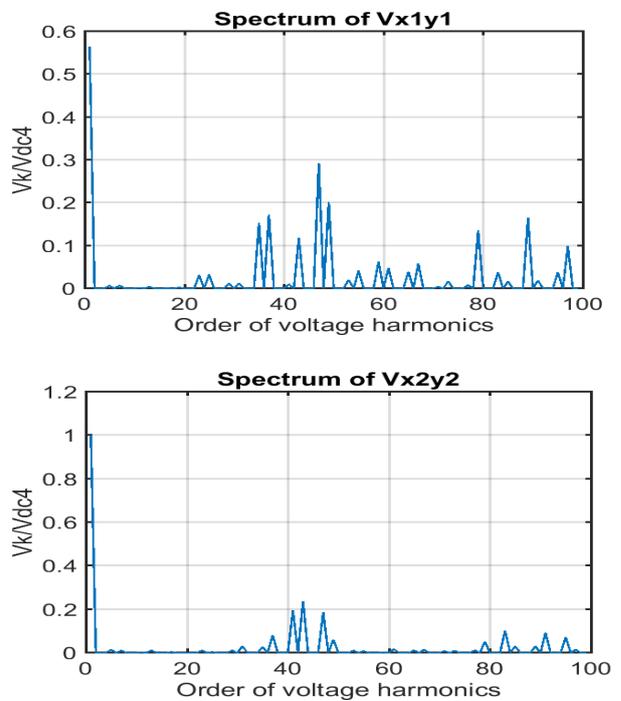


Рис. 11. Спектры напряжений (Режим 3, DPWM60).
 Fig. 11. Voltage spectra (Regime 3, DPWM60).

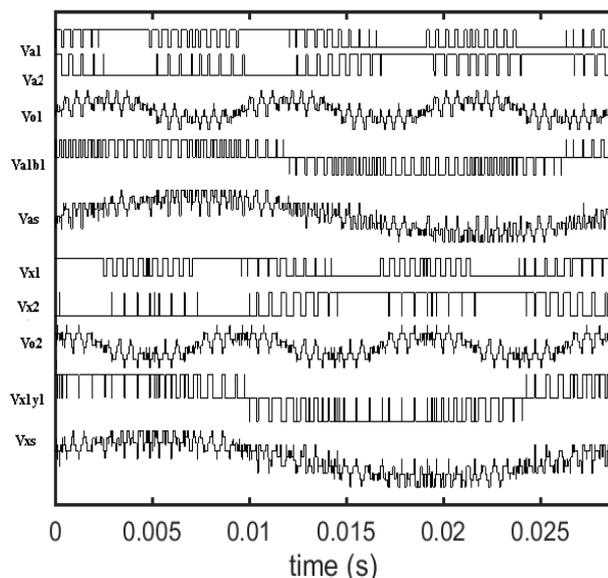


Рис. 12. Базовые напряжения в системе (Режим 4, DPWM30, $P_1=0.23$, $P_2=0.27$, $P_3=0.24$, $P_4=0.26$, $V_{dc1}=0.75V_{dc4}$, $V_{dc2}=0.9 V_{dc4}$, $V_{dc3}=0.8 V_{dc4}$, $V_{dc4}=1$, $m_1=0.93$, $m_2=0.78$, $m_3=0.87$, $m_4=0.7$).
Fig. 12. Basic voltages of installation (Regime 4, DPWM30, $P_1=0.23$, $P_2=0.27$, $P_3=0.24$, $P_4=0.26$, $V_{dc1}=0.75V_{dc4}$, $V_{dc2}=0.9 V_{dc4}$, $V_{dc3}=0.8 V_{dc4}$, $V_{dc4}=1$, $m_1=0.93$, $m_2=0.78$, $m_3=0.87$, $m_4=0.7$).

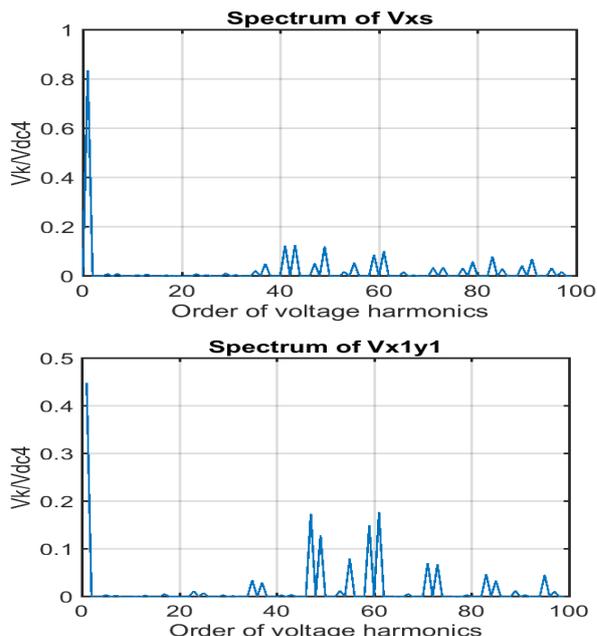


Рис. 14. Спектры напряжений (Режим 4, DPWM30).
Fig. 14. Voltage spectra (Regime 4, DPWM30).

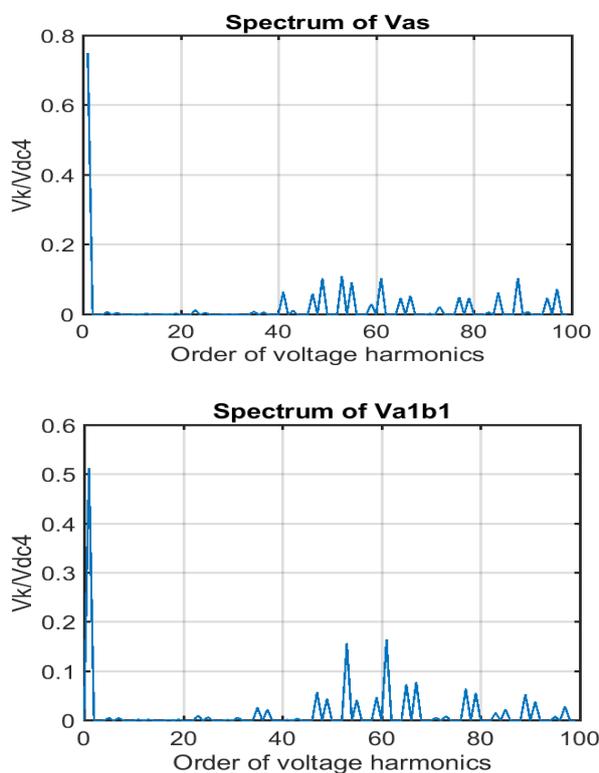


Рис. 13. Спектры напряжений (Режим 4, DPWM30).
Fig. 13. Voltage spectra (Regime 4, DPWM30).

На рис. 15 представлены результаты расчета взвешенного коэффициента искажений (Weighted Total Harmonic Distortion factor

$$(WTHD = (1/V_{as1}) \left(\sum_{k=2}^{1000} (V_{as_k} / k)^2 \right)^{0.5}) \text{ фазового}$$

напряжения V_{as} в функции коэффициента модуляции $m_0 = F/F_m$ применительно к **Режиму 3 (Regime 3)** функционирования шестифазной системы с двумя разновидностями прерывистой синхронной модуляции (DPWM30 и DPWM60). Средняя частота переключения вентилей инверторов принята равной 1кГц .

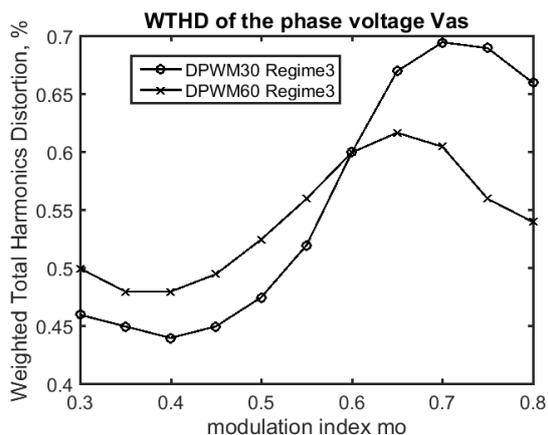


Рис. 15. Взвешенный коэффициент искажения WTHD фазового напряжения V_{as} системы в функции коэффициента модуляции m_0 .
Fig. 15. WTHD factor versus modulation index m_0 .

Приведенные на рис. 15 результаты определения взвешенного коэффициента искажения фазового напряжения показывают, что, в частности, для **Режима 3** работы шестифазной системы, в зоне пониженных выходных частот (в зоне низких значений величины коэффициента модуляции) лучшие интегральные спектральные характеристика фазового напряжения обеспечиваются при использовании алгоритмов прерывистой модуляции с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентиля инверторов (DPWM30).

Соответственно, в зоне повышенных выходных частот улучшенные значения величины искажения фазового напряжения обеспечиваются при использовании схемы прерывистой модуляции с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентиля инверторов (DPWM60).

Заключение

Специализированные схемы управления и прерывистой синхронной модуляции, разработанные для сбалансированного регулирования шестифазной преобразовательной системы на базе четырех трехфазных инверторов, питающихся от автономных источников, позволяют обеспечить как непрерывную синхронизацию кривых фазного и линейного напряжений, так и требуемое распределение мощностей между источниками постоянного тока. Обеспечение требуемого баланса мощностей в системе осуществляется на базе функциональных соотношений, связывающих коэффициенты модуляции отдельных инверторов с амплитудами питающего напряжения соответствующих источников постоянного тока.

Разработанные алгоритмы управления и модуляции обеспечивают при этом сбалансированное синхронное регулирование шестифазной системы как при одинаковой для всех инверторов величине питающего напряжения (**Режим 1**), так и при разных амплитудах питающих напряжений (**Режим 4**).

Представленные на рис. 3, 4, 6, 8, 9, 11, 13 и 14 спектрограммы базовых форм напряжения в анализируемой многоинверторной системе подтверждают тот факт, что при всех режимах управления и модуляции кривые фазового и линейного напряжений характеризуются четвертьволновой симметрией, и в их спектрах отсутствуют четные гармоники, а

также крайне нежелательные субгармоники (выходной частоты). Последний фактор является особенно важным для систем регулируемого электропривода средней и повышенной мощности на базе инверторов с относительно низкими частотами переключения силовых ключей.

Литература (References)

- [1] Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. 724 p.
- [2] Holmes D.G., Lipo T. *Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice*. IEEE Press, 2003. 628 p.
- [3] Bose B.K. Power electronics, smart grid, and renewable energy systems. *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no. 11, pp. 2011-2018.
- [4] Levi E. Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 433-448.
- [5] Barrero F., Duran M. Recent advances in the design, modeling, and control of multiphase machines—Part I. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2016, vol. 63, no. 1, pp. 449-458.
- [6] Grandi G., Tani A., Sanjeevikumar P., Ostojic D. Multi-phase multi-level AC motor drive based on four three-phase two-level inverters. *Proc. of IEEE Int'l Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM'2010)*, 2010, pp. 1768-1775.
- [7] Oleschuk V., Grandi G., Sanjeevikumar P. Simulation of processes in dual three-phase system on the base of four inverters with synchronized modulation. *Advances in Power Electronics*, 2011, vol. 2011, pp. 1-9.
- [8] Grandi G., Sanjeevikumar P., Casadei D. Preliminary hardware implementation of a six-phase quad-inverter induction motor drive. *Proc. of European Power Electronics Conf. (EPE'2011)*, 2011, pp. 1-9.
- [9] Oleschuk V., Ermuratskii V., Barrero F. Modified algorithms of synchronized PWM for six-phase traction drive with two dc-sources. *Proc. of IEEE Int'l Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC'2014)*, 2014, pp. 1-6.
- [10] Sanjeevikumar P., Blaabjerg F., Wheeler P.W., Ojo J.O. Three-phase multilevel inverter configuration for open-winding high power application. *Proc. of IEEE Symp. on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG'2015)*, 2015, pp. 1-6.
- [11] Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. *Power Electronics*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2003. 656 p.
- [12] Narayanan G., Ranganathan V.T. Extension of operation of space vector PWM strategies with low switching frequencies using different

- overmodulation algorithm. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 788-798.
- [13] Beig A.R., Narayanan G., Ranganathan V.T. Modified SVPWM algorithm for three level VSI with synchronized and symmetrical waveforms. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 486-494.
- [14] Rathore A.K., Holtz J., Boller T. Synchronous optimal pulsewidth modulation for low-switching-frequency control of medium-voltage multilevel inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, vol. 57, no. 7, pp. 2374-2381.
- [15] Wei Chen, Haiwei Sun, Xin Gu, Changliang Xia. Synchronized space vector PWM for three level VSI with lower harmonic distortion and switching frequency. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2016, vol. 31, no. 9, pp. 6428-6441.
- [16] Oleschuk V., Profumo F., Griva G., Bojoi R., Stankovic A.M. Analysis and comparison of basic schemes of synchronized PWM for dual inverter-fed drives. *Proc. of IEEE Int'l Symp. on Ind. Electron. (ISIE'2006)*, 2006, pp.2455-2461.
- [17] Oleschuk V., Griva G. Simulation of processes in synchronized cascaded inverters for photovoltaic application. *International Review of Electrical Engineering*, 2009, vol. 4, no. 5, pp. 975-982.
- [18] Oleschuk V., Sizov A., Bose B.K., Stankovic A.M. Phase-shift-based synchronous modulation of dual inverters for an open-end winding motor drive with elimination of zero sequence currents. *Proc. of IEEE Power Electronics and Drive Systems Conf. (PEDS'2005)*, 2005, pp. 325-330.
- [19] Oleschuk V., Barrero F. Standard and non-standard approaches for voltage synchronization of drive inverters with space-vector PWM: A survey. *International Review of Electrical Engineering*, 2014, vol. 9, no. 4, pp. 688-707.
- [20] Oleschuk V., Ermuratskii V., Berzan V. Multilevel converters and drives with space-vector modulation and voltage waveform symmetries. *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Applied and Theoretical Electricity (ICATE'2014)*, 2014, pp. 1-6.

Сведения об авторах.



Олещук Валентин Игоревич.

Доктор (хабилитат) техн. наук, главный научный сотрудник Института энергетики Молдовы. Область научных интересов: стратегии управления и модуляции для силовых преобразователей параметров электрической энергии, для регулируемого электропривода, и для систем возобновляемой энергетики.

E-mail: oleschukv@hotmail.com



Ермуратский Владимир Васильевич.

Доктор (хабилитат) техн. наук, главный научный сотрудник Института энергетики Молдовы, Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, силовые преобразователи, электрические конденсаторы, энергетическая эффективность, теплотехника.

E-mail: ermuratskie@gmail.com