

Analysis and Simulation of Overmodulation Modes of a Three-Inverter Block of the Photovoltaic Installation

Oleschuk V.

Institute of Power Engineering of Moldova
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. The purpose of this work is to modernize the control scheme of a transformer-based photovoltaic system with three inverters controlled by the modified algorithms of synchronous space-vector PWM in order to ensure linear regulation of the system in the overmodulation zone of the inverter block in the process of forming a symmetrical and synchronized (with the operating frequency of the system) voltage on the inverter-side windings of a power transformer. This goal is achieved by the fact that the process of two-stage control of the system in the zone of overmodulation of inverters is carried out on the basis of synchronized phase shifts between the control signals of inverters (a constant phase shift, as well as an additional adjustable phase shift between the inverter signals as a function of the duration of clock subintervals), with an appropriate modification of the algorithms of synchronous PWM of inverters due to the inclusion of two specialized correction factors in the basic functional dependencies. The most significant results of the work include the fact that in a system with a modified control scheme and modulation of the inverter block in the overmodulation zone, the resulting voltage on the inverter-side windings of the power transformer is characterized by quarter-wave symmetry, and its spectrum contains no even-order harmonics, as well as subharmonics, including regimes of fluctuations in the operating frequency of the system connected to a three-phase network, thereby helping to reduce losses in the transformer windings and improve the efficiency of photovoltaic systems.

Keywords: voltage source inverter, photovoltaic system, multi-winding transformer, synchronous pulse modulation, spectrum of the voltage waveform.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2022.3-55.02>

UDC: 621.314.572

Analiza și simularea modurilor de supramodulare ai unui bloc cu trei invertoare ale instalației fotovoltaice

Olesciuk V.

Institutul de Energetică al Republicii Moldova, Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. Eficiența sistemelor de fotoconversie bazate pe invertoare de tensiune depinde atât de topologia sistemelor, cât și de legile și algoritmi de modulare a impulsurilor în durată (PWM) utilizați pentru controlul invertoarelor. Scopul acestei lucrări este de a moderniza circuitul de control al unui sistem fotoconvertor de tip transformator bazat pe trei invertoare cu vector PWM sincronă, pentru a asigura reglarea liniară a sistemului în zona de supramodulație a unității invertoarelor în procesul de formare a unui simetric și sincronizat cu frecvența de funcționare a sistemului de tensiune pe înfășurările invertoarelor transformatorului de putere. Acest obiectiv este realizat prin faptul că, controlul în două etape al sistemului în zona de supramodulație a invertoarelor se realizează pe baza realizării decalajelor de fază sincronizate între semnalele de control al trei invertoare (cu semnal cu decolaj de fază constant, precum și un semnal reglabil suplimentar defazaj între semnalele invertoarelor în funcție de durata subintervalurilor de ceas), cu o modificare corespunzătoare a algoritmilor sincroni ale invertoarelor PWM datorită includerii a doi factori de corecție specializați în dependențele funcționale de bază. Cel mai important rezultat al lucrării include faptul că într-un sistem cu un circuit de control modificat și modulare a unității invertoarelor în zona de supramodulare, tensiunea rezultată pe înfășurările invertoarelor transformatorului de putere este caracterizată de simetrie cu sfert de undă și spectrul său nu conține armonici de ordinul par, precum și subarmonici, inclusiv fluctuații ale frecvenței de funcționare a unui sistem conectat la o rețea trifazată, contribuind astfel la reducerea pierderilor în înfășurările transformatorului și la creșterea eficienței sistemelor de fotoconversie.

Cuvinte-cheie: inverter de tensiune, sistem fotovoltaic, transformator cu multe înfășurări, modulare sincronă prin durată de impulsuri, componență spectrală a tensiunii.

Анализ и моделирование режимов сверхмодуляции трехинверторного блока фотоэлектрической установки
Олещук В.И.

Институт энергетики Молдовы, Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Эффективность работы фотопреобразовательных систем на базе инверторов напряжения зависит как от топологии систем, так и от законов и алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), используемых при управлении инверторами. Целью данной работы является модернизация схемы управления фотопреобразовательной системы трансформаторного типа на базе трех инверторов с синхронной векторной ШИМ, с целью обеспечения линейного регулирования системы в зоне сверхмодуляции инверторного блока в процессе формирования симметричного и синхронизированного с рабочей частотой системы напряжения на инверторных обмотках силового трансформатора. Поставленная цель достигается тем, что двухэтапное управление системой в зоне сверхмодуляции инверторов осуществляется на базе синхронизированных фазовых сдвигов между управляющими сигналами трех инверторов (постоянного фазового сдвига, а также дополнительного регулируемого фазового сдвига между сигналами инверторов в функции продолжительности тактовых подинтервалов), при соответствующей модификации алгоритмов синхронной ШИМ инверторов за счет включения в базовые функциональные зависимости двух специализированных корректирующих коэффициентов. К наиболее существенным результатам работы следует отнести тот факт, что в системе с модифицированной схемой управления и модуляции инверторного блока в зоне сверхмодуляции результирующее напряжение на инверторных обмотках силового трансформатора характеризуется четвертьволновой симметрией, и в его спектре отсутствуют гармоники четного порядка, а также субгармоники, в том числе при флюктуации рабочей частоты системы, связанной с трехфазной сетью, способствуя тем самым снижению потерь в обмотках трансформатора и повышению эффективности функционирования фотопреобразовательных систем. Также, важными и значимыми являются полученные в результате моделирования сведения о том, что при регулировании инверторного блока фотопреобразовательной системы в зоне сверхмодуляции улучшенные интегральные спектральные характеристики напряжения на обмотках силового трансформатора достигаются при использовании для управления инверторами модифицированных алгоритмов прерывистой синхронной модуляции с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентилях.

Ключевые слова: инвертор напряжения, фотопреобразовательная система, многообмоточный трансформатор, синхронная импульсная модуляция, спектральный состав напряжения.

ВВЕДЕНИЕ

Новые структуры и топологии многоуровневых и многофазных силовых преобразователей параметров электрической энергии, при помощи которых обеспечиваются рациональные и экономичные режимы работы систем различного функционального назначения, находят всё более широкое применение в области электрического транспорта и возобновляемых источников электрической энергии [1] – [4].

Фотопреобразовательные системы являются одними из наиболее распространенных устройств возобновляемой электроэнергетики [5] – [6]. В настоящее время существует большое количество структур и топологий фотопреобразовательных систем трансформаторного и бестрансформаторного типа [7] – [13]. Разработаны и исследованы различные конфигурации преобразовательных модулей инверторного типа, преобразующих постоянный ток и напряжение фотопреобразовательных панелей в переменное напряжение на выходе инверторных блоков. При этом в качестве инверторов фотопреобразователь-

ных систем могут быть использованы различные модификации инверторов напряжения (двухуровневые трехфазные инверторы, инверторы с отсекающими диодами, многоуровневые инверторы, инверторы каскадного и модульного типов, и т.д.) [10], [11], [13].

Эффективность функционирования фотопреобразовательных систем инверторного типа находится в большой зависимости от методов и способов управления и широтно-импульсной модуляции (ШИМ), используемых для регулирования инверторов соответствующих устройств и установок [13] – [20]. Известно также, что большая часть диапазона регулирования инверторов напряжения фотопреобразовательных систем сопряжена со сравнительно мало исследованными специфическими режимами работы инверторов в зоне сверхмодуляции, характеризующимися повышенными, близкими к максимальным, значениями индекса модуляции инверторов.

В связи с этим, целью данной работы является обеспечение улучшенного гармонического состава на инверторных обмотках силового трансформатора трехинверторной фотопреобразовательной системы специ-

ческой конфигурации, путем развития и диссеминации основанной на специальных фазовых сдвигах сигналов трех инверторов схемы управления в зоне сверхмодуляции инверторов, и соответствующей модификации алгоритмов синхронной векторной ШИМ отдельных инверторов.

I. ТОПОЛОГИЯ ФОТО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ТРЕХ ИНВЕРТОРОВ

В [7] предложена и исследована трехинверторная структура фотопреобразователь-

ной установки трансформаторного типа со специфическим соединением выходных цепей ШИМ-инверторов с инверторными обмотками трансформатора (рис. 1 [7]). Данная топология системы позволяет обеспечить, в частности, повышение величины переменного напряжения на инверторных обмотках многообмоточного силового трансформатора (по сравнению с двухинверторными фотопреобразовательными устройствами), способствуя тем самым снижению общего веса и габаритов подобных установок [7], [19].

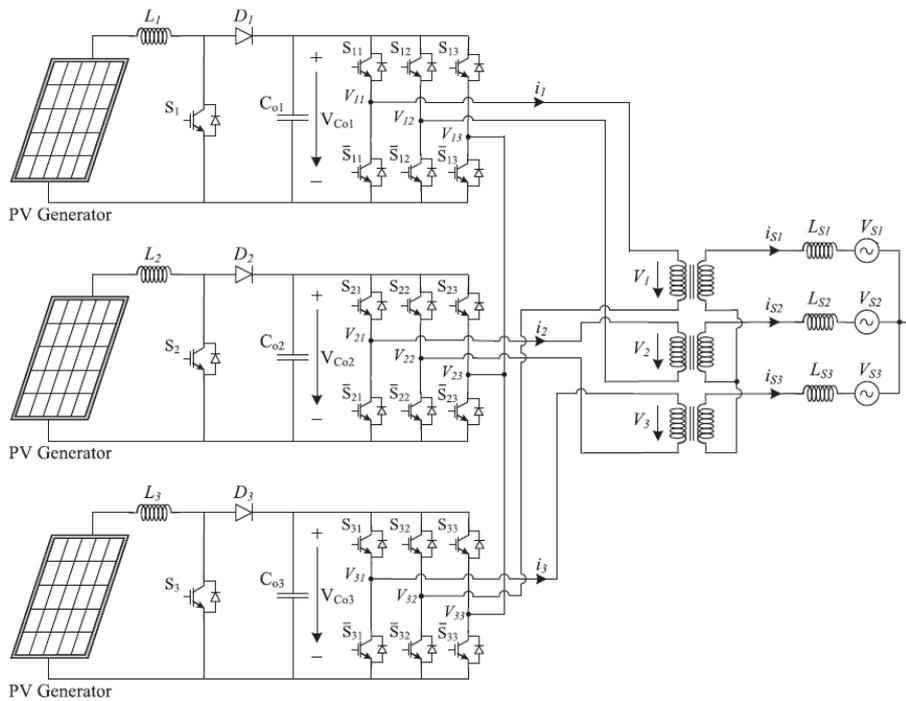


Рис. 1. Схема основных силовых цепей трехинверторной фотопреобразовательной системы трансформаторного типа [7]¹.

II. СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ШИМ-ИНВЕРТОРОВ В ЗОНЕ СВЕРХМОДУЛЯЦИИ

Регулирование инверторов фотопреобразовательных установок при повышенных значениях коэффициента модуляции инверторов m (при работе инверторов в зоне сверхмодуляции (overmodulation) когда $1 \geq m > 0.907$), характеризуется специфическими особенностями. В частности, при стандартном двухэтапном регулировании инверторов в зоне сверхмодуляции два граничных значения коэффициента модуляции инверторов m_{ov1} и m_{ov2} равны соответственно $m_{ov1} = 0.907$ и $m_{ov2} = 0.952$, максимальное значение коэффициента модуляции равно

$m_{max} = 1$ в этом случае. Соответственно, приведенные ниже базовые функциональные зависимости (1) – (7) для определения параметров управляющих сигналов двухуровневых трехфазных инверторов с синхронной векторной ШИМ включают два специализированных коэффициента сверхмодуляции $K_{ov1} = [1 - (m - m_{ov1}) / (m_{ov2} - m_{ov1})]$ и $K_{ov2} = [1 - (m - m_{ov2}) / (1 - m_{ov2})]$

В частности, при $0.952 \geq m > 0.907$:

$$\beta_1 = \tau \tag{1}$$

$$\beta_j = \beta_1 \cos[(j-1)\tau K_{ov1}] \tag{2}$$

$$\gamma_j = \beta_{n-j+1} \{0.75 - 0.55 \tan[(n-j)\tau]\} \tag{3}$$

$$\lambda_j = \tau - (\beta_j + \beta_{j+1})/2 \quad (4)$$

При $l > m > 0.952$:

$$\beta_1 = \tau \quad (5)$$

$$\beta_j = \beta_1 \cos[(j-1)\pi K_{ov2}] \quad (6)$$

$$\gamma_j = \beta_{n-j+1} \{0.75 - 0.55 \tan[(n-j)\tau]\} K_{ov2} \quad (7)$$

где m – коэффициент модуляции инвертора, $\beta_1 \div \beta_j$ – суммарная продолжительность активного (включенного) состояния ключей инвертора на протяжении тактового подинтервала τ , γ_j – меньшая часть суммарной продолжительности активного состояния ключей инвертора, λ_j – длительность выключенного состояния ключей инвертора.

III. СИНХРОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ТРЕХ ИНВЕРТОРОВ

Результирующие напряжения V_1, V_2, V_3 на инверторных обмотках силового трансформатора фотопреобразовательной системы, представленной на рис. 1, могут быть определены в функции соответствующих напряжений трех двухуровневых инверторов напряжения [7]:

$$V_1 = V_{11} - V_{13} - V_{32} + V_{33} \quad (8)$$

$$V_2 = V_{21} - V_{23} - V_{12} + V_{13} \quad (9)$$

$$V_3 = V_{31} - V_{33} - V_{22} + V_{23} \quad (10)$$

В соответствии с разработанной схемой управления тремя трехфазными инверторами фотопреобразовательной системы, сигналы управления инверторами генерируются с постоянным взаимным фазовым сдвигом в 120 электрических градусов, а также с дополнительным корректирующим фазовым сдвигом между управляющими сигналами инверторов, равным одной трети продолжительности тактового подинтервала τ .

А. Работа системы в первой части зоны сверхмодуляции инверторов

Регулирование инверторов фотопреобразовательной системы в первой части зоны сверхмодуляции, при $0.952 \geq m > 0.907$, характеризуется плавным квазилинейным увеличением суммарной продолжительности

активных управляющих сигналов инверторов (β -параметр в (2)) вплоть до достижения продолжительностей β -сигналов длительности тактового подинтервала τ [13],[15],[18]. Одновременно, в этой части зоны сверхмодуляции наблюдается плавное уменьшение длительностей λ -сигналов (4) до близких к нулю значений.

В качестве иллюстрации процессов в фотопреобразовательной системе на базе трех инверторов, работающих в первой части зоны сверхмодуляции, на рис. 2 – рис. 7 представлены, на основе MATLAB-моделирования, базовые формы напряжения анализируемой системы, а также их спектры. В частности, на рис. 2, рис. 4, и рис. 6 показаны полярные напряжения V_{11}, V_{12} и V_{13} первого инвертора, линейные напряжения первого и второго инверторов ($V_{12} - V_{13}$) и ($V_{21} - V_{23}$), а также результирующее напряжение V_2 на инверторной обмотке силового трансформатора. На рис. 3, рис. 5, и рис. 7 представлены спектральные характеристики линейного напряжения ($V_{21} - V_{23}$), и результирующего напряжения V_2 . Рабочая частота системы равна 50 Гц , средняя частота коммутации вентилей инверторов F_k равна 1120 Гц .

Диаграммы, представленные на рис. 2 и рис. 3, иллюстрируют процессы в системе с тремя двухуровневыми инверторами регулируемые на базе алгоритмов непрерывной синхронной широтно-импульсной модуляции (PWM_C). На рис. 4 – 5 приведены соответствующие диаграммы для системы с инверторами, регулируемые на базе схемы прерывистой синхронной модуляции с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей (PWM_D_30), на рис. 6 – 7 показаны соответствующие диаграммы для системы с тремя инверторами, регулируемые на базе алгоритмов прерывистой синхронной модуляции с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей (PWM_D_60). Коэффициент модуляции трех инверторов системы равен в этих случаях $m = 0.935$.

Базовые формы напряжения для анализируемой трехинверторной фотопреобразовательной системы представлены на рис. 2, рис. 4, и рис. 6, как на периоде выходной частоты $0^\circ - 360^\circ$ (верхние диаграммы на рис. 2, 4, 6), так и, для более детального анализа, на интервале $0^\circ - 60^\circ$ (нижние диаграммы на рис. 2, 4, 6).

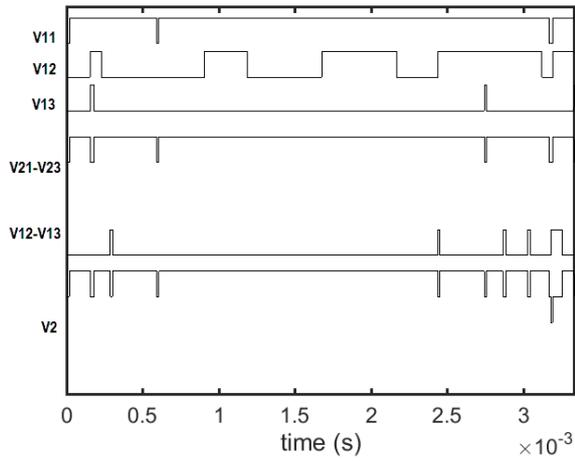
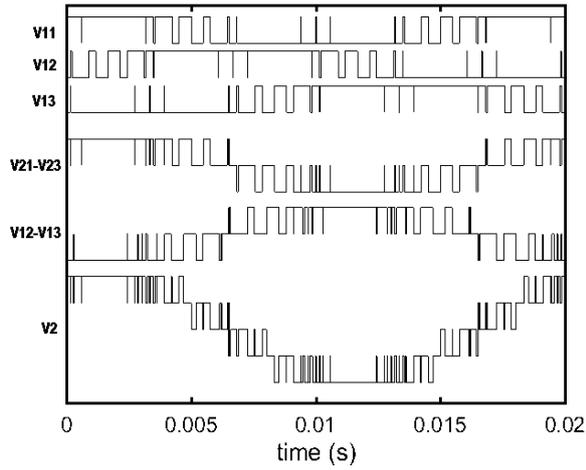


Рис. 2. Напряжения в системе с непрерывной ШИМ (PWM_C, $m = 0.935$, $F_k = 1120$ Гц).²

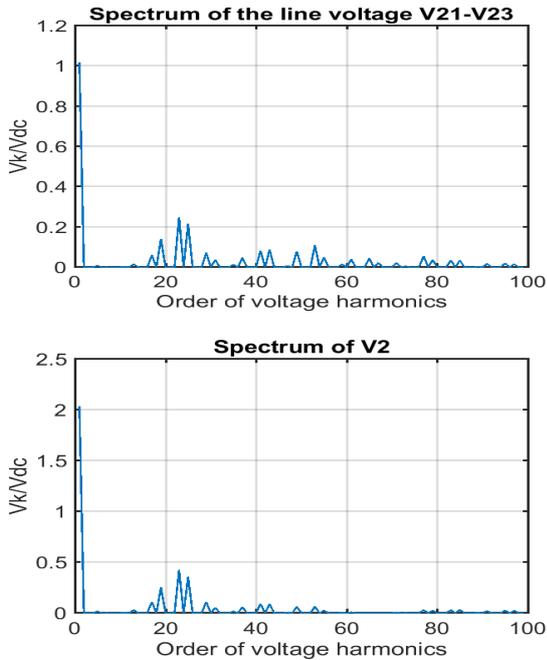


Рис. 3. Гармонический состав напряжений (PWM_C, $m = 0.935$, $F_k = 1120$ Гц).³

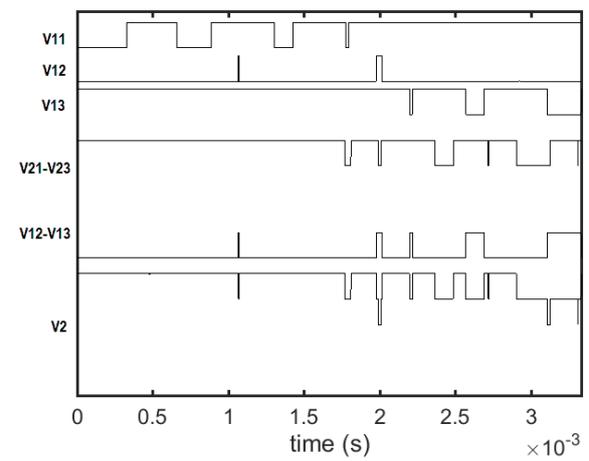
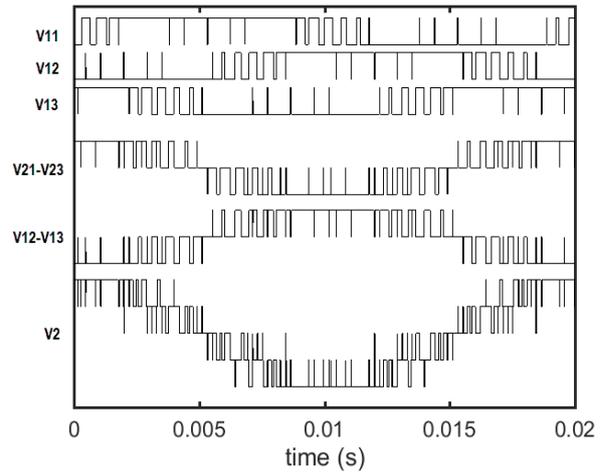


Рис. 4. Напряжения в системе с прерывистой ШИМ (PWM_D_30, $m = 0.935$, $F_k = 1120$ Гц).⁴

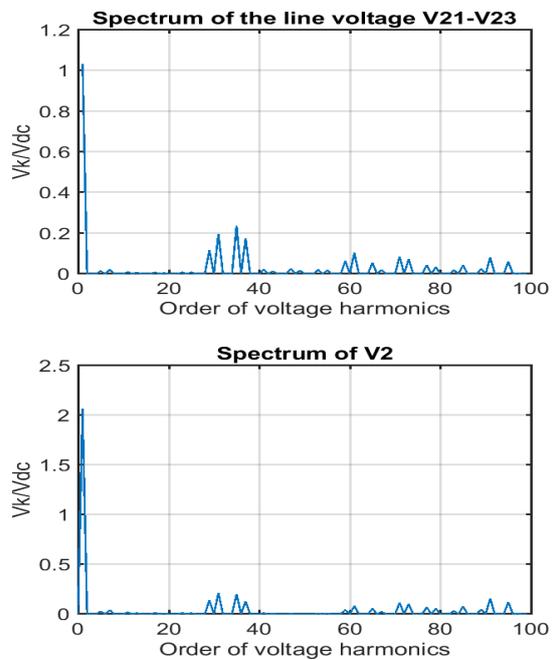


Рис. 5. Гармонический состав напряжений (PWM_D_30, $m = 0.935$, $F_k = 1120$ Гц).⁵

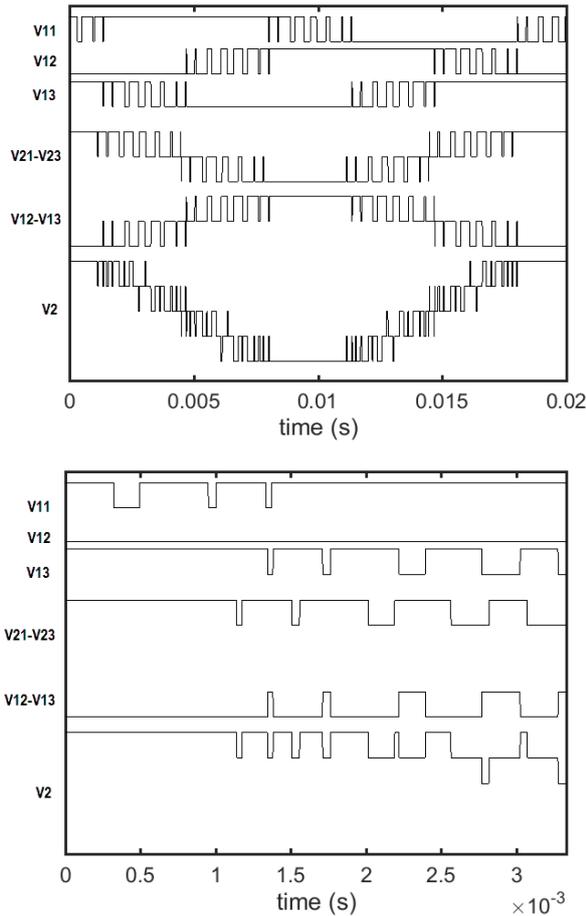


Рис. 6. Напряжения в системе с прерывистой ШИМ (PWM_D_60, $m = 0.935$, $F_k = 1120$ Гц).⁶

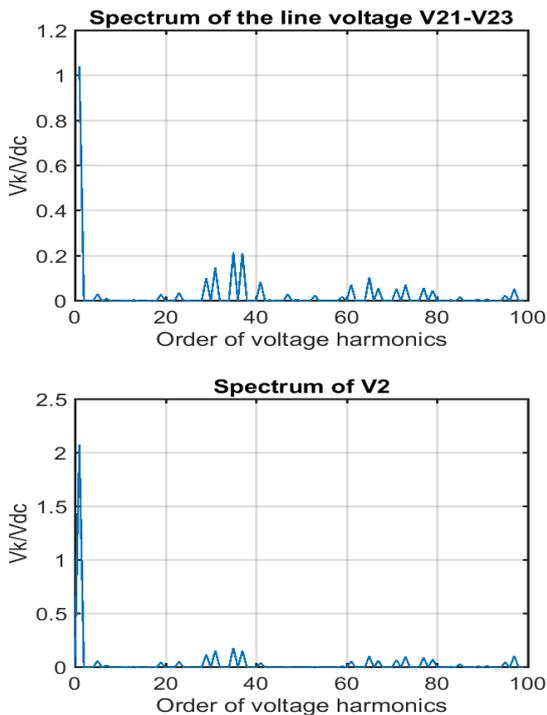


Рис. 7. Гармонический состав напряжений (PWM_D_60, $m = 0.935$, $F_k = 1120$ Гц).⁷

Приведенные на рис. 3, 5, и 7 спектрограммы подтверждают тот факт, что в спектрах базовых напряжений фотопреобразовательной системы на базе трех инверторов с алгоритмами синхронной векторной модуляции отсутствуют четные гармоники и субгармоники (выходной частоты системы).

Б. Работа системы во второй части зоны сверхмодуляции инверторов

Функционирование системы во второй части зоны сверхмодуляции инверторов, при котором относительно коэффициента модуляции инверторов m выполняется условие: $1 \geq m > 0.952$, характеризуется, при увеличении величины коэффициента модуляции, плавным уменьшением продолжительностей всех γ -сигналов управления вплоть до близких к нулевым значениям при максимальной величине коэффициента модуляции инверторов.

Для иллюстрации процессов в фотопреобразовательной системе на базе трех инверторов, работающих в этой зоне регулирования, рис. 8 – рис. 11 показывают полученные при помощи MATLAB-моделирования основные формы напряжения в системе, а также их спектральные характеристики. Рабочая частота системы равна 50 Гц, средняя частота коммутации вентиля инверторов F_k равна 1120 Гц.

Диаграммы, представленные на рис. 8 и рис. 9, иллюстрируют процессы в системе с тремя двухуровневыми инверторами регулируемые на базе алгоритмов прерывистой синхронной модуляции с 30 -градусными интервалами непроводящего состояния вентиля (PWM_D_30), на рис. 10 – 11 показаны соответствующие диаграммы для системы с тремя инверторами, регулируемые на базе схемы прерывистой синхронной модуляции с 60 -градусными интервалами непроводящего состояния вентиля (PWM_D_60). Коэффициент модуляции инверторов равен в этих случаях $m = 0.98$.

Верхние диаграммы на рис. 8 и рис. 10 представляют базовые напряжения в системе на периоде выходной частоты $0^\circ - 360^\circ$, нижние диаграммы на рис. 8 и рис. 10 показывают кривые соответствующих импульсных напряжений более детально, внутри интервала $0^\circ - 60^\circ$.

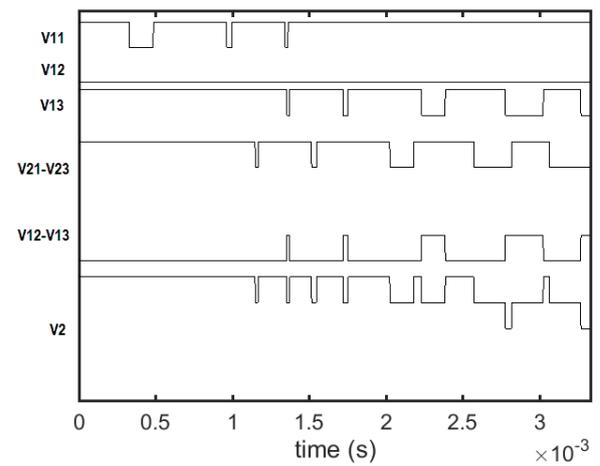
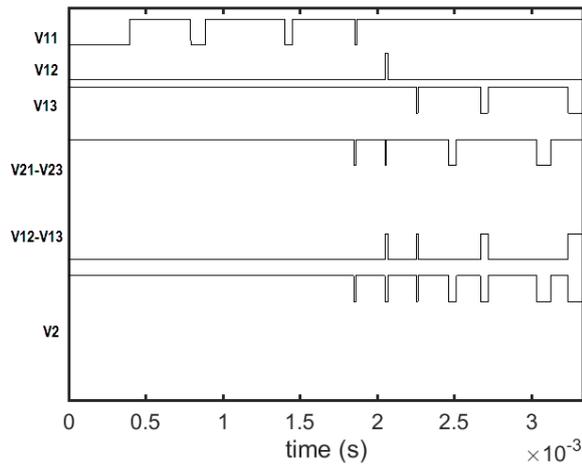
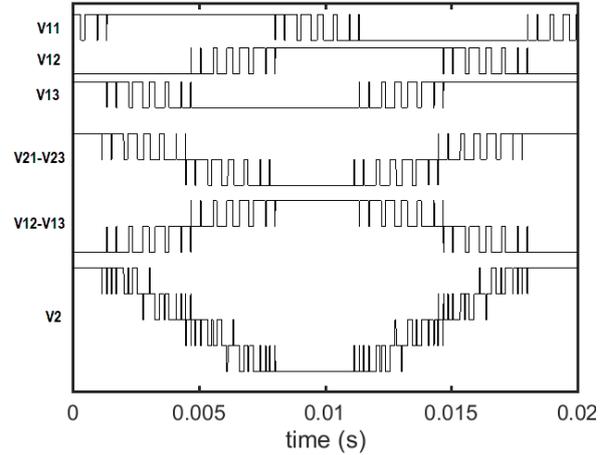
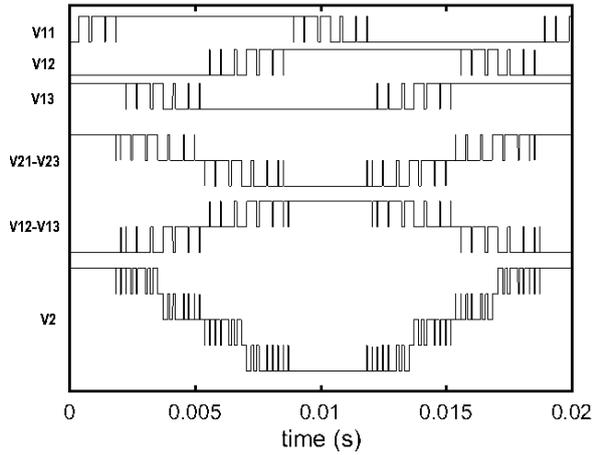


Рис. 8. Напряжения в системе с прерывистой ШИМ (PWM_D_30, $m = 0.98$, $F_k = 1120$ Гц).⁸

Рис. 10. Напряжения в системе с прерывистой ШИМ (PWM_D_60, $m = 0.98$, $F_k = 1120$ Гц).¹⁰

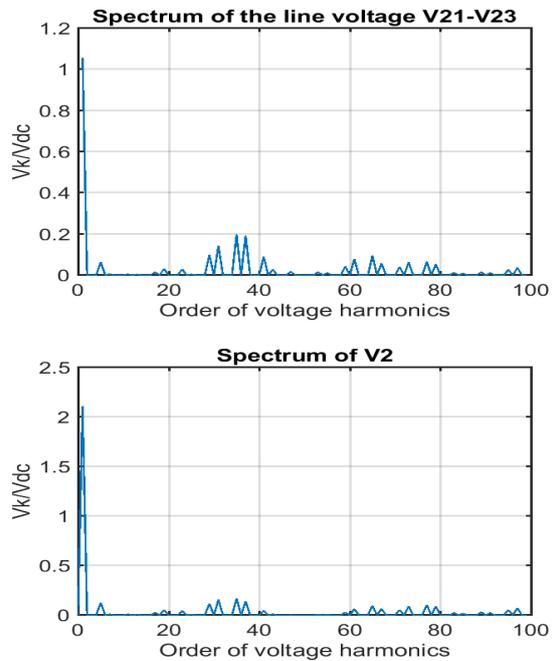
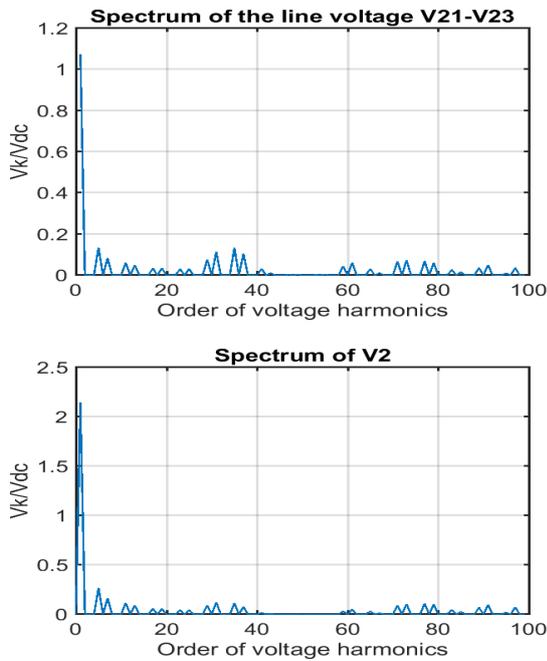


Рис. 9. Гармонический состав напряжений (PWM_D_30, $m = 0.98$, $F_k = 1120$ Гц).⁹

Рис. 11. Гармонический состав напряжений (PWM_D_60, $m = 0.98$, $F_k = 1120$ Гц).¹¹

Приведенные на рис. 9 - рис. 11 диаграммы иллюстрируют тот факт, что в анализируемой трехинверторной системе специализированные алгоритмы синхронной модуляции позволяют успешно обеспечить симметрию и улучшенный спектральный состав базовых напряжений (без четных гармоник и субгармоник) также при работе инверторов во второй части зоны сверхмодуляции.

IV. КОЭФФИЦИЕНТ ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБМОТКАХ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Для сопоставительного анализа интегральных спектральных характеристик базовых форм напряжения фотопреобразовательной системы на базе трех инверторов с алгоритмами синхронной ШИМ целесообразно использовать величину коэффициента искажения соответствующих форм напряжения. На рис. 12 – рис. 14 представлены результаты расчета коэффициента искажения базового результирующего напряжения V_2 (Total Harmonic Distortion (THD) factor of V_2) на инверторных обмотках силового трансформатора системы в функции коэффициента модуляции инверторов m , выполненного в соответствии с (11) – (13) для трех значений индекса k ($k = 50$, $k = 100$, и $k=500$), характеризующего число гармоник низкого порядка, берущихся в расчет при вычислении коэффициента искажения, применительно к трем базовым схемам синхронного ШИМ-регулирования инверторов системы в зоне сверхмодуляции (PWM-C – схема непрерывной синхронной модуляции, PWM-D-30 – схема прерывистой синхронной модуляции с 30-градусными интервалами непроводящего состояния вентилях, PWM-D-60 - схема прерывистой синхронной модуляции с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентилях). Средняя частота коммутации вентилях инверторов принята равной 1120 Гц.

$$THD = (1/V_{2_1}) \sqrt{\sum_{k=2}^{50} V_{2_k}^2} \quad (\text{рис. 12}) \quad (11)$$

$$THD = (1/V_{2_1}) \sqrt{\sum_{k=2}^{100} V_{2_k}^2} \quad (\text{рис. 13}) \quad (12)$$

$$THD = (1/V_{2_1}) \sqrt{\sum_{k=2}^{500} V_{2_k}^2} \quad (\text{рис. 14}) \quad (13)$$

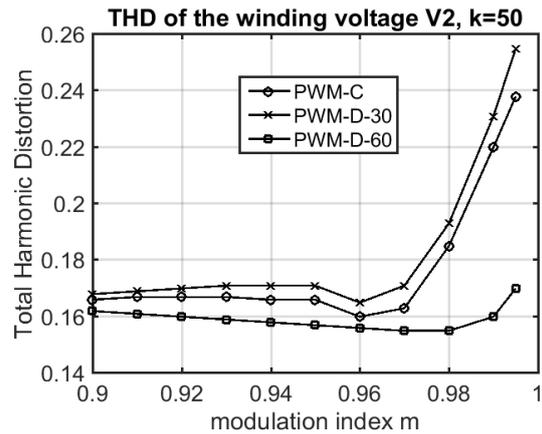


Рис. 12. Коэффициент искажения напряжения V_2 в функции индекса модуляции m ($k=50$).¹²

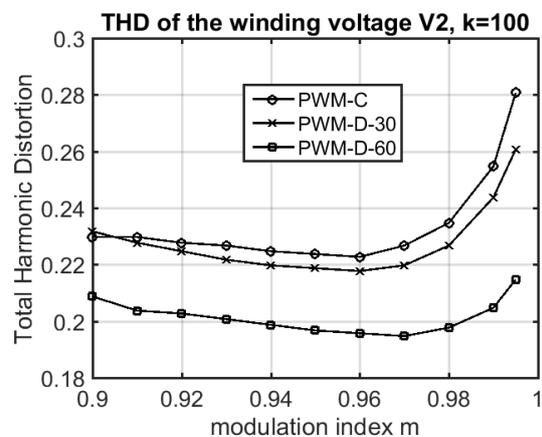


Рис. 13. Коэффициент искажения напряжения V_2 в функции индекса модуляции m ($k=100$).¹³

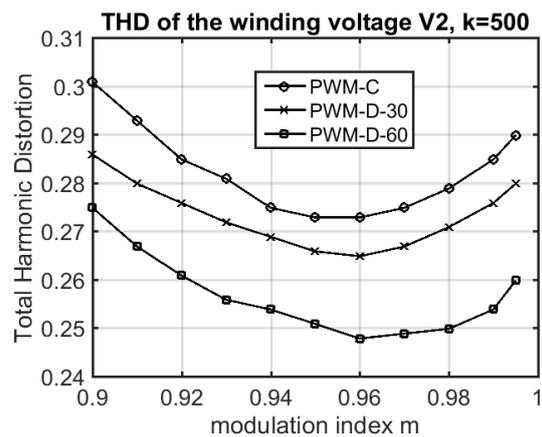


Рис. 14. Коэффициент искажения напряжения V_2 в функции индекса модуляции m ($k=500$).¹⁴

Представленные на рис. 12 – рис. 14 результаты определения коэффициента искажения напряжения V_2 на инверторных обмотках силового трансформатора анализируемой фотопреобразовательной системы показывают, что при регулировании инвер-

торов системы в зоне сверхмодуляции улучшенные (уменьшенные) значения коэффициента искажения результирующего напряжения V_2 обеспечиваются (в том числе при различном количестве принятых во внимание при расчетах гармоник низкого порядка) при регулировании инверторов на базе модифицированных алгоритмов прерывистой синхронной модуляции с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей (PWM-D-60 на рис. 12 – 14).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что модифицированная схема управления и алгоритмы синхронной векторной модуляции могут быть успешно использованы для регулирования трех двухуровневых инверторов фотопреобразовательной системы со специальной схемой соединения обмоток силового трансформатора с выходными цепями инверторов, обеспечивая симметрию форм напряжения на инверторных обмотках силового трансформатора при специфических условиях работы инверторного блока системы в зоне сверхмодуляции.

Представленные на рис. 3, 5, 7, 9, и 11 характеристики спектрального состава линейного напряжения инверторов, регулируемых на базе модифицированных алгоритмов векторной ШИМ, и результирующего напряжения на инверторных обмотках силового трансформатора, подчеркивают факт отсутствия в спектрах напряжений гармоник четного порядка и субгармоник (основной частоты системы) на всем диапазоне двухэтапного регулирования инверторов в зоне сверх-модуляции, в том числе при флюктуации рабочей частоты фотопреобразовательной системы, связанной с трехфазной сетью.

На базе сопоставительного анализа интегральных спектральных характеристик базовых напряжений в системе определено, что улучшенные (уменьшенные) значения коэффициента искажения результирующего напряжения на обмотках трансформатора обеспечиваются при регулировании инверторов на базе модифицированных алгоритмов прерывистой синхронной модуляции с 60-градусными интервалами непроводящего состояния вентилей.

Улучшение гармонического состава напряжения на инверторных обмотках сило-

вого трансформатора анализируемой системы позволяет обеспечить снижение потерь в обмотках трансформатора, способствуя тем самым повышению эффективности функционирования трехфазных фотопреобразовательных систем трансформаторного типа.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 (APPENDIX 1)

¹**Fig. 1.** Topology of three-inverter-based photovoltaic installation.

²**Fig. 2.** Basic voltage waveforms (version of continuous PWM_C, $m = 0.935$, $F_s = 1120$ Hz).

³**Fig. 3.** Spectra of the basic voltages (version of continuous PWM_C, $m = 0.935$, $F_s = 1120$ Hz).

⁴**Fig. 4.** Basic voltage waveforms (version of discontinuous PWM_D_30, $m = 0.935$, $F_s = 1120$ Hz).

⁵**Fig. 5.** Spectra of the basic voltages (version of discontinuous PWM_D_30, $m = 0.935$, $F_s = 1120$ Hz).

⁶**Fig. 6.** Basic voltage waveforms (version of discontinuous PWM-D-60, $m = 0.935$, $F_s = 1120$ Hz).

⁷**Fig. 7.** Spectra of the basic voltages (version of discontinuous PWM_D_60, $m = 0.935$, $F_s = 1120$ Hz).

⁸**Fig. 8.** Basic voltage waveforms (version of discontinuous PWM_D_30, $m = 0.98$, $F_s = 1120$ Hz).

⁹**Fig. 9.** Spectra of the basic voltages (version of discontinuous PWM_D_30, $m = 0.98$, $F_s = 1120$ Hz).

¹⁰**Fig. 10.** Basic voltage waveforms (version of discontinuous PWM_D_60, $m = 0.98$, $F_s = 1120$ Hz).

¹¹**Fig. 11.** Spectra of the basic voltages (version of discontinuous PWM_D_60, $m = 0.98$, $F_s = 1120$ Hz).

¹²**Fig. 12.** THD of the winding voltage V_2 ($k = 50$).

¹³**Fig. 13.** THD of the winding voltage V_2 ($k = 100$).

¹⁴**Fig. 14.** THD of the winding voltage V_2 ($k = 500$).

Литература (References)

- [1] Malinowski M., Gopakumar K., Rodriguez J., Pérez M.A. A survey on cascaded multilevel inverters. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, vol. 57, no.7, pp. 2197-2206.
- [2] Colak I., Kabalci E., Bayindir R. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes. *Energy Conversion and Management*, 2011, vol. 52, iss. 2, pp. 1114-1128.
- [3] Sankeevikumar P., Bhaskar M.S., Maroti P.K., Blaabjerg F., Siano P., Oleschuk V. Hextuple-inverter configuration for multilevel nine-phase symmetrical open-winding converter. *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES'2016)*, 2016, 6 p.
- [4] Bose B.K. Power electronics, smart grid, and renewable energy systems. *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no. 11, pp. 2011-2018.
- [5] Grandi G., Rossi C., Ostojic D., Casadei D. A new multilevel conversion structure for grid-connected PV applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2009, vol. 56, no 11, pp. 4416-4426.

- [6] Singh G.K. Solar power generation by PV (photovoltaic) technology: a review. *Energy*, 2013, vol. 53, pp. 1–13.
- [7] Pires V.F., Cordeiro A., Foito D., Silva J.F. Three-phase multilevel inverter for grid-connected distributed photovoltaic systems based in three three-phase two-level inverters. *Solar Energy*, 2018, vol. 174, pp. 1026-1034.
- [8] Baoji Wang, Xing Zhang, Chao Song, Renxian Cao. Research on the filters for dual-inverter fed open-end winding transformer topology in photovoltaic grid-tied applications. *Energies*, 2019, vol. 12, iss. 12, pp. 1-21.
- [9] Pires V., Foito D., Cordeiro A. PV power conditioning system using a three-phase multilevel pulse width modulation inverter employing cascaded Scott transformers. *IET Power Electron.*, 2019, vol. 12, iss. 1, pp. 102-111.
- [10] Kolantla D., Mikkili S., Pendem S.R., Desai A.A. Critical review on various inverter topologies for PV system architectures. *IET Renewable Power Generation*, 2020, vol. 14, iss. 17, pp. 3418-3438.
- [11] Amir A., Selvaraj J., Rahim N.A. Grid-connected photovoltaic system employing a single-phase T-type cascaded H-bridge inverter. *Solar Energy*, 2020, vol. 199, pp. 645-656.
- [12] Ramya R., Sivakumaran, T.S. Design and control strategies of quasi-z source inverter for photovoltaic power generation systems. *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Devices, Circuits and Systems (ICDCS'2020)*, 2020, 6 p.
- [13] Silva J.J., Bahia F.A.C., Tahim A.P.N., Fernandes D.A., Costa F.F. A single-phase five-level grid-connected inverter for photovoltaic applications. *Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE'2021)*, 2021, pp. 2529-2536.
- [14] Aiello M., Cataliotti A., Favuzza S., Graditi G. Theoretical and experimental comparison of Total Harmonic Distortion factors for the evaluation of harmonic and interharmonic pollution of grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 3, pp. 1390-1397.
- [15] Husev O., Roncero-Clemente C., Romero-Cadaval E., Vinnikov D., Jalakas T. Three-level three-phase quasi-z-source neutral-point-clamped inverter with novel modulation technique for photovoltaic application. *Electric Power Systems Research*, 2016, vol. 130, no. 1, pp. 10-21.
- [16] Del Pizzo A., Di Noia L.P., Meo S. Super twisting sliding mode control of smart-inverters grid-connected for PV applications. *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA'2017)*, 2017, pp. 793-796.
- [17] Sonti V., Jain S., Bhattacharya S. Analysis of the modulation strategy for the minimization of the leakage current in the PV grid-connected cascaded multilevel inverter. *IEEE Trans. on Power Electron.*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 1156-1169.
- [18] Komurcugil H., Bayhan S. PI and sliding mode based control strategy for three-phase grid-tied three-level T-type qZSI. *Proc. of IEEE Int'l Conf. of Ind. Electron. (IECON'2019)*, 2019, 6 p.
- [19] Foito D., Pires V.F., Cordeiro A., Silva J.F. Sliding mode vector control of grid-connected PV multilevel systems based on triple three-phase two-level inverters. *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Renewable Energy Research and Application (ICRERA'2020)*, 2020, pp.399-404.
- [20] Yadav S.K., Mishra N., Singh B. Multilevel converter with nearest level control for integrating solar photovoltaic system. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, 2022, vol. 58, iss. 4, pp. 4305-4312.

Сведения об авторах.



Валентин Игоревич Олещук, доктор (хабилитат) технических наук. Область научных интересов: стратегии управления и импульсной модуляции сигналов для силовых полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.
E-mail: oleschukv@hotmail.com