

Nonlinear Control of an Open-Loop Open-Winding Motor System with Modulated Converters

Oleschuk V.I.

Institute of Power Engineering of the Academy of Sciences of Moldova
Kishinau, Republic of Moldova

Abstract. Purpose of this work - to provide wider control opportunities for multiphase open-end winding motor drive by modification of basic scheme of space-vector pulse-width modulation (PWM). It has been shown, that the proposed development of basic PWM scheme insures available solutions for realization of specific control dependences and modes of operation of adjustable speed ac drives with different types and kinds of loads. Suitable algorithms of PWM of converters of multiphase drive have been analyzed and compared. Extensive simulation studies have been executed for evaluation of performance and effectiveness of the proposed control strategy. Assessment of harmonic composition of the phase voltages of drive system with modified scheme of space-vector modulation has been done. Results of the executed simulations proved the fact, that the developed techniques of space-vector pulse-width modulation allow providing quarter-wave or half-wave symmetry of waveforms of the output voltage of six-phase adjustable speed drive systems during the analyzed non-standard modes and regimes of its operation.

Keywords: multiphase ac drives, power electronic converters, control and modulation strategies.

Dirijarea neliniară cu convertoare cu modularea de impuls a sistemului acționări electrice cu înfășurarea deschisă a mașinii

Olesciuk V.I.

Institutul de Energetică al Academiei de Științe a Moldovei
Chișinău, Republica Moldova

Rezumat. În scopul de a oferi oportunități mai largi de dirijare pentru acționările electrice multifazate cu înfășurarea deschisă a motorului a fost propusă simpla modificare a schemei de bază a modulării sincronă-vectorială. Aceasta asigură soluții disponibile pentru realizarea dependențelor specifice de dirijare și a regimurilor specifice de funcționare a acționărilor electrice reglabile cu diferite tipuri de sarcini. Au fost analizați și comparați algoritmi corespunzători ai modulației pentru convertoarele acționărilor electrice multifazate. Au fost executate studii de simulări extensive pentru evaluarea performanței și a eficienței strategiei propuse de dirijare. A fost efectuată estimarea compoziției armonice a tensiunilor de fază a sistemului de acționare electrică dirijată cu schema modificată de modulare.

Cuvinte-cheie: acționări electrice multifazate de curent alternativ, convertoare electronice de putere, strategii de dirijare și de modulare.

Нелинейные законы регулирования электропривода с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя на базе четырех ШИМ-инверторов

Олещук В.И.

Институт энергетики Академии наук Молдовы
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Предложена модифицированная схема синхронной векторной модуляции сигналов автономных инверторов напряжения системы шестифазного электропривода с разомкнутыми обмотками асинхронного электродвигателя, позволяющая обеспечить различные нелинейные режимы регулирования системы в зависимости от вида и типа нагрузок на валу электродвигателя. Проанализированы и сопоставлены алгоритмы непрерывной и прерывистой модифицированной векторной модуляции. Выполнено моделирование процессов в многофазной (шестифазной) преобразовательной системе с модифицированной схемой синхронной векторной модуляции, проведена интегральная оценка гармонического состава фазных напряжений в системе.

Ключевые слова: многофазный электропривод переменного тока, силовые электронные преобразователи, стратегии управления и модуляции.

Введение

Многофазные и многоинверторные преобразовательные системы находят всё большее практическое применение в последние годы [1]-[3]. Одной из перспективных структур таких систем

является приведенная на рис. 1 система шестифазного электропривода с разомкнутыми обмотками асимметричного асинхронного электродвигателя, содержащая два комплекта обмоток, пространственно сдвинутых на 30 эл. градусов одна относительно другой. В систему

электропитания двигателя при этом входят четыре источника постоянного тока и четыре инвертора напряжения (INV1 – INV4) [4]-[5].

Стандартное скалярное регулирование систем регулируемого электропривода переменного тока с асинхронными электродвигателями базируется на принципе поддержания постоянства отношения величины питающего двигатель напряжения к его частоте ($V/F=const$). Для некоторых специфических нагрузок требуется реализация нелинейных зависимостей между величиной питающего двигатель напряжения и его частотой. При этом реализация нестандартных нелинейных зависимостей напряжения к частоте может быть обеспечена за счет соответствующей модификации схемы синхронной векторной модуляции инверторов, входящих в состав системы регулируемого электропривода.

1. СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ МЕТОДА СИНХРОННОЙ ВЕКТОРНОЙ МОДУЛЯЦИИ

Новый метод синхронной векторной модуляции сигналов автономных инверторов напряжения для систем регулируемого электропривода, обеспечивающий симметрию и улучшенный спектральный

состав форм выходного напряжения, был предложен и развит применительно к базовым топологиям преобразовательных схем [6]-[7].

В частности, базовая схема синхронной векторной модуляции включает некоторые дополнительные параметры и новые функциональные зависимости по сравнению с классической векторной модуляцией. В число таких параметров входят граничные частоты F_i и F_{i-1} между поддиапазонами регулирования, определяемые в соответствии с (1)-(2) в зависимости от значений продолжительностей тактовых под-интервалов τ . Индекс i в (1)-(2) характеризует количество пауз в кривой выходного напряжения на половине 60-градусных тактовых интервалов трехфазной системы, и определяется в соответствии с (3), с округлением дробных значений до ближайшего большего целого значения. Алгоритмы векторной модуляции обеспечивают при этом симметрию форм фазного напряжения шестифазных систем при любых величинах питающего напряжения автономных источников [5].

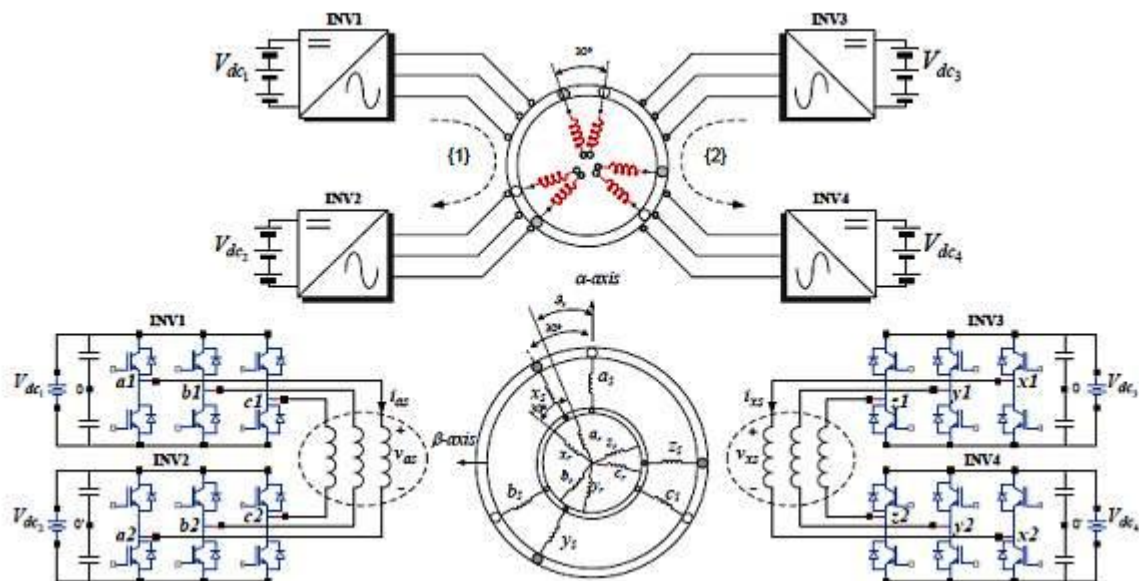


Рис. 1. Шестифазный электропривод с разомкнутыми обмотками асимметричного асинхронного электродвигателя и с двумя инверторными секциями по два инвертора в каждой (INV1+INV2, питающиеся от источников V_{dc1} и V_{dc2} , и INV3+INV4, питающиеся от источников V_{dc3} и V_{dc4}).

$$F_i = 1/[6(2i - K_1)\tau] \quad (1)$$

$$F_{i-1} = 1/[6(2i - K_2)\tau] \quad (2)$$

$$i = (1/6F + K_1\tau)/2\tau, \quad (3)$$

где $K_1=1$, $K_2=3$ для непрерывной синхронной модуляции, $K_1=1.5$, $K_2=3.5$ для прерывистой синхронной модуляции.

Для некоторых специальных видов нагрузок требуются нестандартные (нелинейные) режимы регулирования систем

электропривода [8]-[10]. Реализация нелинейной взаимосвязи между напряжением и частотой инверторов для систем электропривода с алгоритмами синхронной векторной модуляцией может быть осуществлена за счет соответствующей модификации функциональной зависимости для определения β_1 – параметра схемы синхронной модуляции. В таблице I представлены выражения для определения величины β_1 – параметра (а также формулы для расчета граничных частот в зоне сверхмодуляции) для трех режимов регулирования, включая стандартный режим линейного регулирования $V/F=const$, а также два нелинейных режима регулирования $V^2/F=const$ и $V^{3/2}/F=const$ (m - коэффициент модуляции напряжения инверторов).

Кривые на рис. 2 иллюстрируют процесс регулирования относительной величины выходного напряжения в функции выходной частоты системы для трех упомянутых в таблице I режимов управления, при максимальной выходной частоте системы $F_m=50\text{Hz}$. Также, различные промежуточные режимы управления могут быть обеспечены путем соответствующей модификации выражения для определения β_1 – параметра, и в качестве примера на рис. 2 пунктиром показано изменение величины выходного напряжения в системе при реализации нелинейного регулирования по закону $V^{4/3}/F=const$ (в этом случае $\beta_1 = 1.1\sqrt[4]{m^3\tau}$).

II. АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Фазные напряжения V_{as} и V_{xs} первой и второй инверторных групп системы с четырьмя источниками питания (рис. 1) определяются в соответствии с (4)-(7) [5].

Таблица I. ПАРАМЕТРЫ СИГНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО И ДВУХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ШЕСТИФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Режим управления	β_1	F_{ov1}	F_{ov2}
$V/F=const$	$1.1m\tau$	$0.907F_m$	$0.952F_m$
$V^2/F=const$	$1.1\sqrt{m}\tau$	$0.823F_m$	$0.907F_m$
$V^{3/2}/F=const$	$1.1\sqrt[3]{m^2}\tau$	$0.866F_m$	$0.931F_m$

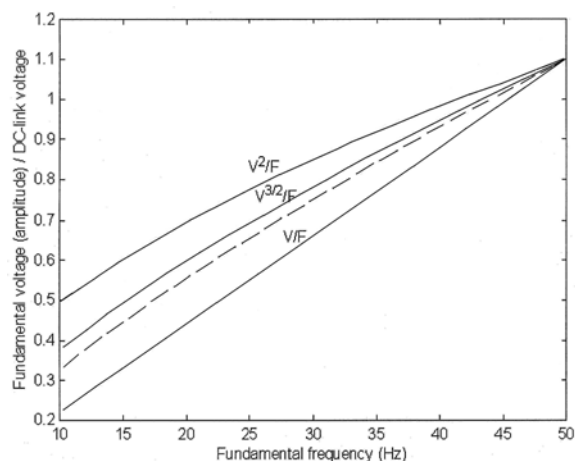


Рис. 2. Величина выходного напряжения в функции выходной частоты для линейного и нелинейных режимов регулирования системы.

$$V_{01} = 1/3(V_{a1} + V_{b1} + V_{c1} + V_{a2} + V_{b2} + V_{c2}) \quad (4)$$

$$V_{as} = V_{a1} + V_{a2} - V_{01} \quad (5)$$

$$V_{02} = 1/3(V_{x1} + V_{y1} + V_{z1} + V_{x2} + V_{y2} + V_{z2}) \quad (6)$$

$$V_{xs} = V_{x1} + V_{x2} - V_{02}, \quad (7)$$

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.

Для обеспечения равенства амплитуд фазных напряжений и баланса мощностей двух инверторных секций в шестифазной системе необходимо обеспечить выполнение соотношения (8), связывающего коэффициенты модуляции четырех инверторов с напряжениями соответствующих источников постоянного тока:

$$m_1 V_{dc1} + m_2 V_{dc2} = m_3 V_{dc3} + m_4 V_{dc4} \quad (8)$$

С целью исследования функционирования шестифазной системы при нелинейных законах регулирования, шесть типовых режимов работы системы с непрерывной (CPWM) и прерывистой (DPWM, [6],[7]) синхронной модуляцией были выбраны в качестве базовых для анализа процессов в системе (Таблица II, **Режимы 1-6**). При этом принято, что напряжение питания инвертора **INV4** характеризуется максимальной относительной величиной $V_{dc4}=1$, а

амплитуды напряжений других источников меньше или равны амплитуде V_{dc4} . Соответственно, частота переключений вентилей инвертора **INV4** выбрана равной $F_{s4}=1kHz$, при этом частоты переключений других инверторов могут быть больше или равны величине $F_{s4}=1kHz$ (находясь в обратно пропорциональной зависимости от напряжений соответствующих источников питания).

ТАБЛИЦА II. ШЕСТЬ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЖИМОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

Режим	F , Hz	Параметр	INV1	INV 2	INV 3	INV 4
1 (DPWM) $V^2/F=const$	36	V_{dc}	1	1	1	1
		F_s	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz
2 (DPWM) $V^2/F=const$	37	V_{dc}	0.5	1	0.5	1
		F_s	2kHz	1kHz	2kHz	1kHz
3 (DPWM) $V^{3/2}/F=const$	41	V_{dc}	1	1	1	1
		F_s	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz
4 (DPWM) $V^{3/2}/F=const$	39	V_{dc}	0.6	1	0.6	1
		F_s	1.7 kHz	1kHz	1.7kHz	1kHz
5 (CPWM) $V^2/F=const$	38	V_{dc}	1	1	1	1
		F_s	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz
6 (CPWM) $V^2/F=const$	42	V_{dc}	1	1	1	1
		F_s	1kHz	1kHz	1kHz	1kHz

На рис. 3 – рис. 14 представлены результаты MATLAB-моделирования шестифазной системы с нелинейными законами управления в соответствии с **Режимами 1-6** (таблица II), в частности, здесь приведены формы нормализованного полярного, фазного и линейного напряжений, а также спектральный состав фазных и линейных напряжений в системе.

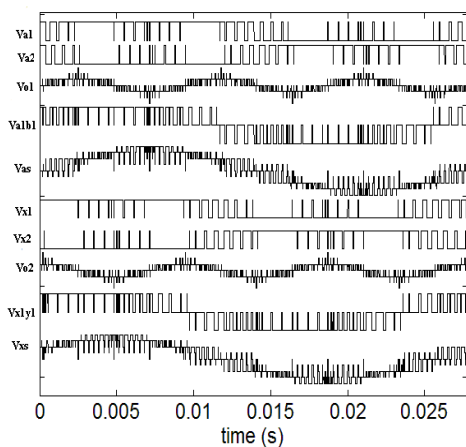


Рис. 3. Базовые напряжения в системе с прерывистой синхронной модуляцией (Режим 1, $V^2/F=const$, $F=36Hz$, $F_s=1kHz$).

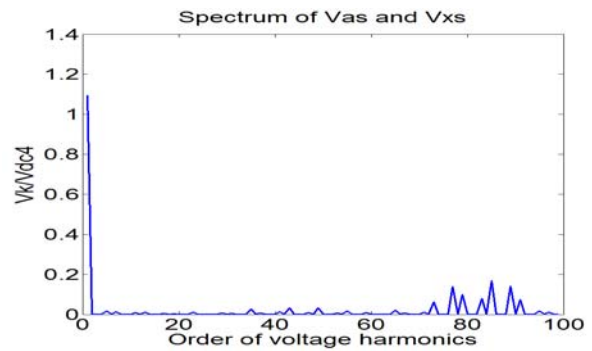


Рис. 4. Спектр фазных напряжений (Режим 1, DPWM, $V^2/F=const$).

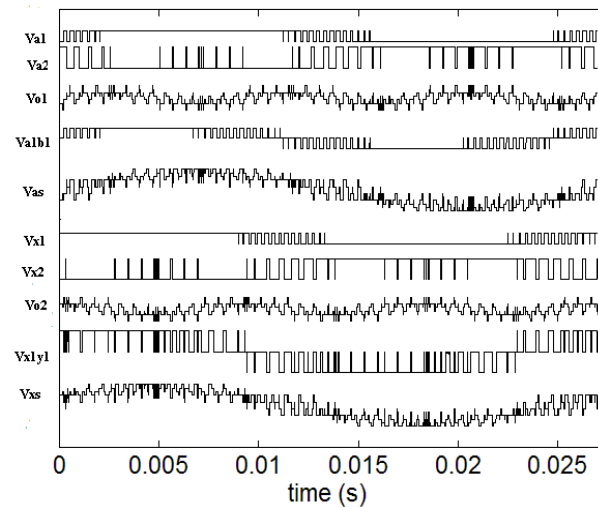


Рис. 5. Базовые напряжения в системе с прерывистой синхронной модуляцией (Режим 2, $V^2/F=const$, $F=37Hz$).

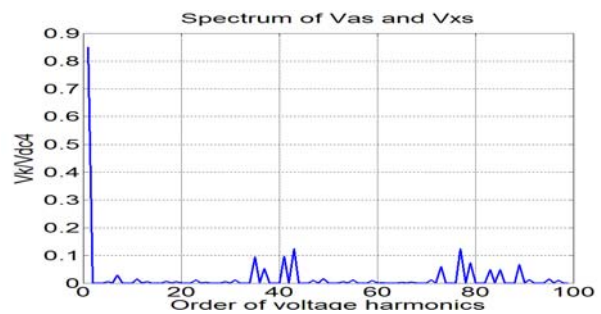


Рис. 6. Спектр фазных напряжений (Режим 2, DPWM, $V^2/F=const$).

Представленные на рис. 4, 6, 8, 10, 12, 14 спектры фазных напряжений шестифазной системы подтверждают тот факт, что при нелинейных законах регулирования системы электропривода использование модифицированных алгоритмов синхронной векторной модуляции позволяет обеспечить симметрию форм выходных напряжений, в спектре которых на всем диапазоне регулирования отсутствуют четные

гармоники и субгармоники.

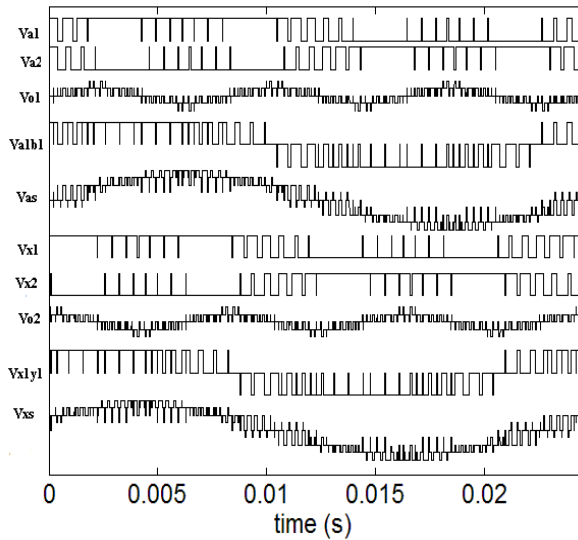


Рис. 7. Базовые напряжения в системе с прерывистой синхронной модуляцией (Режим 3, $V^{3/2}/F=const$, $F=41\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

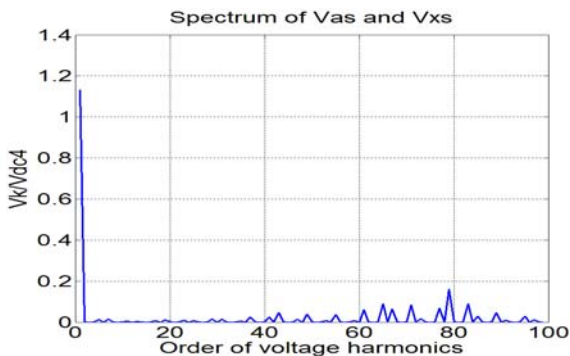


Рис. 8. Спектр фазных напряжений (Режим 3, DPWM, $V^{3/2}/F=const$).

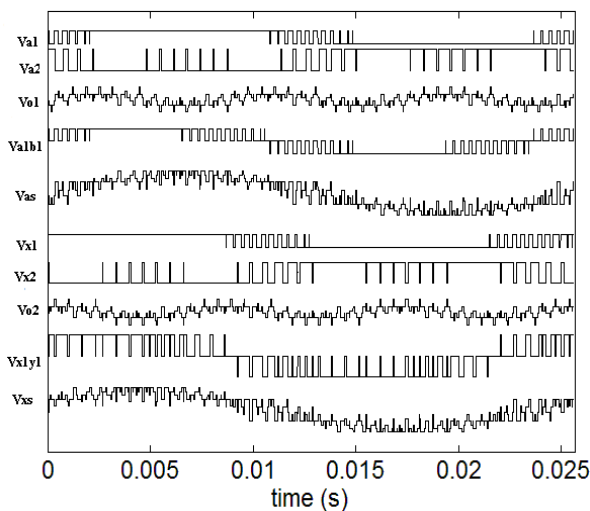


Рис. 9. Базовые напряжения в системе с прерывистой синхронной модуляцией (Режим 4, $V^{3/2}/F=const$, $F=39\text{Hz}$).

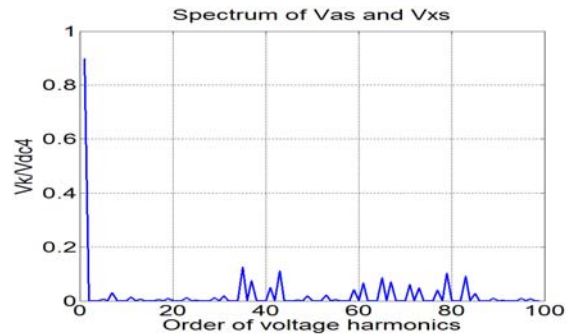


Рис. 10. Спектр фазных напряжений (Режим 4, DPWM, $V^{3/2}/F=const$).

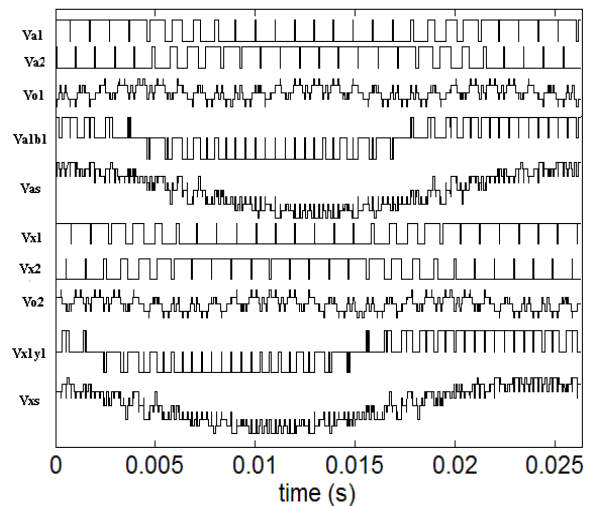


Рис. 11. Базовые напряжения в системе с непрерывной синхронной модуляцией (Режим 5, $V^2/F=const$, $F=38\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

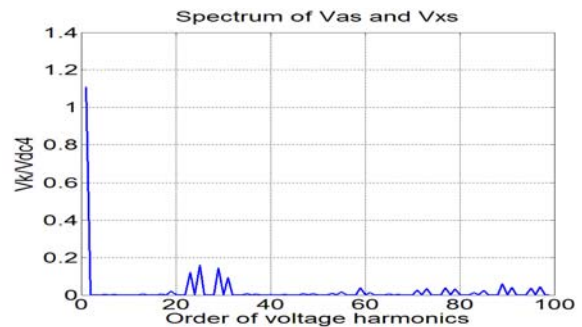


Рис. 12. Спектр фазных напряжений (Режим 5, CPWM, $V^2/F=const$).

С целью определения интегральных спектральных характеристик фазного напряжения в системе шестифазного электропривода с нелинейными законами регулирования был выполнен расчет взвешенного коэффициента искажений напряжения $WTHD$ (9) в функции выходной частоты системы электропривода при максимальной выходной частоте $F_m=50\text{Hz}$.

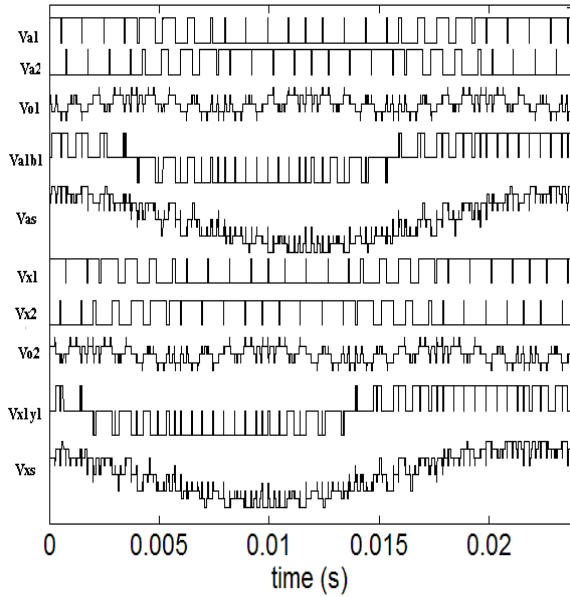


Рис. 13. Базовые напряжения в системе с непрерывной синхронной модуляцией (Режим 6, $V^{3/2}/F=const$, $F=42Hz$, $F_s=1kHz$).

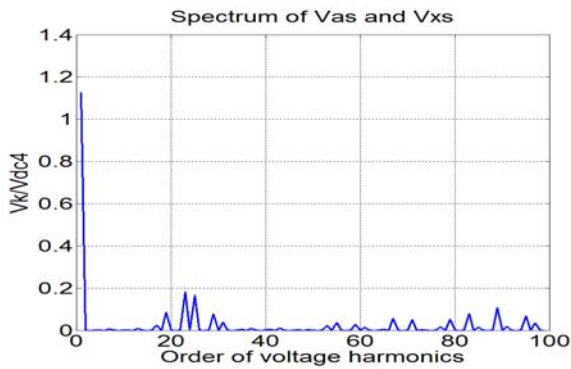


Рис. 14. Спектр фазных напряжений (Режим 6, CPWM, $V^{3/2}/F=const$).

$$WTHD = (1/V_{as1}) \left(\sum_{k=2}^{1000} (V_{as_k} / k)^2 \right)^{0.5} \quad (9)$$

Средняя частота коммутации вентиля инверторов принята равной $1kHz$. На рис. 15 представлены результаты расчета взвешенного коэффициента искажений фазного напряжения шестифазной системы (при одинаковых напряжениях источников питания постоянного тока) с алгоритмами непрерывной (CPWM) и прерывистой (DPWM) синхронной модуляции, регулируемой в соответствии с нелинейными законами управления $V^2/F=const$ (Режим (Mode) 1, Режим (Mode) 5), и $V^{3/2}/F=const$ (Режим (Mode) 3, Режим (Mode) 6).

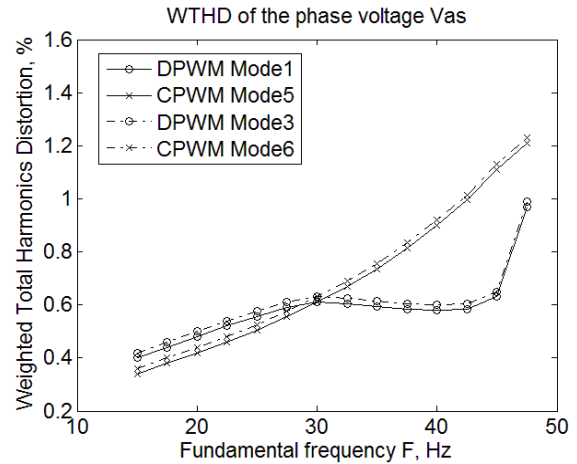


Рис. 15. Взвешенный коэффициент искажения фазного напряжения V_{as} шестифазной системы с нелинейными законами регулирования.

IV. ВЫВОДЫ

1. Показано, что модифицированные алгоритмы синхронной векторной модуляции сигналов инверторов разомкнутой системы шестифазного электропривода позволяют обеспечить нелинейные зависимости между выходным напряжением и частотой системы в процессе регулирования. Требуемая нелинейная взаимосвязь между величиной напряжения и выходной частотой в системе обеспечивается при этом соответствующей модификацией выражения для определения β_1 -параметра схемы синхронной модуляции (β_1 - продолжительность опорных центральных сигналов управления внутри тактовых 60-градусных интервалов периода выходной частоты системы).

2. Модифицированные алгоритмы синхронной модуляции обеспечивают четвертьволновую симметрию выходного напряжения шестифазной системы с нелинейными законами регулирования при любых соотношениях (в том числе дробных) между частотой переключения вентиля инверторов и выходной частотой F_s/F (в случае равных амплитуд напряжения питающих инверторы источников (Режимы 1, 3, 5-6), вышеуказанные соотношения F_s/F соответственно равны: $1000Hz/36Hz=27.8$, $1000Hz/41Hz=24.4$, $1000Hz/38Hz=26.3$, $1000Hz/42Hz=23.8$).

3. Модифицированные алгоритмы синхронной модуляции обеспечивают полуволновую симметрию выходного напряжения шестифазной системы с нелинейными законами регулирования при неодинаковых амплитудах питающих инверторы напряжений и различных частотах коммутации вентиля F_s отдельных

инверторов (**Режимы 2 и 4**, в этих случаях $V_{dc1}=0.5V_{dc4}$, $F_{sINV1}=2F_{sINV4}$ (**Режим 2**), и $V_{dc1}=0.6V_{dc4}$, $F_{sINV1}=1.7F_{sINV4}$ (**Режим 4**), при этом отношение F_{sINV1}/F_{sINV4} частоты коммутации вентилей к выходной частоте для первого инвертора системы для данных двух режимов соответственно равно: $2000\text{Hz}/37\text{Hz}=54.1$, $1700\text{Hz}/39\text{Hz}=43.6$).

4. Представленные на рис. 4, 6, 8, 10, 12, 14 спектры фазных напряжений шестифазной системы подтверждают тот факт, что при нелинейных законах регулирования системы электропривода использование модифицированных алгоритмов синхронной векторной модуляции позволяет устранить из спектра выходных напряжений четные гармоники и субгармоники во всем диапазоне регулирования, что является особенно важным для систем регулируемого электропривода средней и большой мощности.

Литература (References)

- [1] Parsa L., "On advantages of multi-phase machines," *Proc. of IEEE Ind. Electr. Conf. (IECON'2005)*, pp. 1574-1579, 2005.
- [2] Lega A., Mengoni M., Serra G., Tani A. and Zarrì L., "Space vector modulation for multiphase inverters based on a space partitioning algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, vol. 56, no. 10, pp. 4119 – 4131, 2009.
- [3] Levi E., "Advances in converter control and innovative exploitation of additional degrees of freedom for multiphase machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 1, pp. 433–448, 2016.
- [4] Grandi G., Sanjeevikumar P., Ostojic D. and Rossi C., "Quad-inverter configuration for multiphase multi-level AC motor drives," *Proc. of IEEE Conf. "Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering" (SIBIRCON'2010)*, pp. 631 – 638, 2010.
- [5] Oleschuk V., Grandi G. and Sanjeevikumar P., "Simulation of processes in dual three-phase system on the base of four inverters with synchronized modulation," *Advances in Power Electronics*, vol. 2011, pp. 1-9, 2011.
- [6] Oleschuk V., Ermuratski V. and Chekhet E.M., "Drive inverters with synchronized PWM during overmodulation", *Proc. of IEEE Int'l Symp. On Ind. Electronics (ISIE'2004)*, pp. 1339-1344, 2004.
- [7] Oleschuk V. and Griva G., "Simulation of processes in synchronized cascaded inverters for photovoltaic application," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 5, pp. 975-982, 2009.
- [8] Jun Li, Zhou Yang and Weizu Wang, "Adaptive nonlinear control for multiphase PM synchronous motor drive system," *Proc. of IEEE*

Int'l Conf. on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM'2011), pp. 132-136, 2011.

- [9] Patel B., Uddin M.N., "Development of a nonlinear loss minimization control of an IPMSM drive with flux estimation," *Proc. of IEEE Electric Machines & Drives Conf. (IEMDC'2013)*, pp. 1196-1203, 2013.
- [10] Schoonhoven G.M., Uddin M.N., "Wide speed range operation of PMSM drives using nonlinear flux control techniques," *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Electrical and Computer Engineering (ICECE'2014)*, pp. 603-606, 2014.

Сведения об авторе.



Валентин Олещук

(oleschukv@hotmail.com), доктор (хабилитат) техн. наук, главный научный сотрудник Института энергетики Академии наук Молдовы. Область научных интересов: стратегии управления и модуляции для силовых преобразователей параметров электрической энергии, для регулируемого электропривода, и для систем возобновляемой электроэнергетики.