

Multilevel Converters with Voltage Waveform Symmetries for Power Six-Phase Traction Drive

Oleschuk V., Ermuratskii V.

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

Abstract. Research of dual three-phase transport-oriented power conversion system on the base of four three-level inverters with specialized switching strategy insuring both synchronization of control modes of inverters and quarter-wave symmetry of the phase voltages of system has been executed. Detailed modeling of processes in systems with basic versions of control algorithms has been done. It has been shown, that value of weighted total harmonic distortion factor of the phase voltage of controlled ac electric drive system with four three-level inverter is up to 60-95% lower than for a similar system based on two inverters. The use of algorithms of discontinuous synchronous modulation assure lower (up to 15%) value weighted total harmonic distortion factor of the phase voltage in comparison with the corresponding integral spectral characteristics of the phase voltage of system, controlled by algorithms of direct synchronous modulations.

Keywords: voltage source inverter, algorithms of pulsewidth modulation, dual three-phase system, modulated output voltage, harmonics, spectral composition.

Convertoare cu multe niveluri cu tensiune de ieșire simetrică pentru acționări electrice puternice cu șase-faze pentru transportul electric

Olesciuk V. și Ermuratschii V.

Institutul de Energetica al Academiei de Științe a Moldovei
Chisinau, Republica Moldova

Rezumat. S-a efectuat cercetarea sistemului trifazat dublu de conversie a energiei destinate transportului electric pe baza a patru invertoarelor de tensiune în trei nivele, cu strategie specială de control și modulare, ce asigură atât sincronizarea regimurilor de funcționare a invertoarelor, cât și simetria de un sfert de undă a curbei tensiunii fazei. S-a efectuat modelarea detaliată a proceselor în sisteme cu versiuni de bază ale algoritmilor de control și reglare. S-a demonstrat, că valoarea ponderată a factorul de distorsiune a tensiunii de fază a sistemului de acționări electrice cu patru invertoare de trei nivele este de până la 60-95% mai mică, decât pentru un sistem similar în baza a două invertoare. Aplicarea algoritmilor de modulare sincronă discontinuă asigură o valoare ponderată factorul de distorsiune a tensiunii de fază mai mică (până la 15%) în comparație cu caracteristicile integrale spectrale respective ale tensiunii de fază a sistemului dirijat prin algoritmi de modulare sincronă directă.

Cuvinte-cheie: invertor de tensiune, algoritmi de modulare, sistemul trifazat dublu, tensiunea de ieșire modulată, armonici, componența spectrală.

Многоуровневые преобразователи с симметричным выходным напряжением для мощного шестифазного транспортного электропривода

Олещук В.И. и Ермуратский В.В.

Институт энергетики Академии наук Молдовы
Кишинев, Республика Молдова

Аннотация. Проведено исследование двоякой трехфазной преобразовательной системы транспортного назначения на базе четырех трехуровневых инверторов напряжения со специализированной стратегией регулирования и модуляции, обеспечивающей как синхронизацию режимов функционирования всех инверторов, так и четвертьволновую симметрию кривых фазного выходного напряжения. Выполнено детальное моделирование процессов в системах с базовыми разновидностями алгоритмов управления и регулирования. Показано, что величина взвешенного коэффициента искажений фазного напряжения системы асинхронного электропривода с четырьмя трехуровневыми инверторами на 60-95% ниже, чем для аналогичной системы на базе двух инверторов. При этом использование алгоритмов прерывистой синхронной модуляции позволяет обеспечить меньшую (до 15%) величину взвешенного коэффициента искажений фазного напряжения по сравнению с соответствующими интегральными спектральными характеристиками фазного напряжения системы, регулируемой на базе алгоритмов прямой синхронной модуляции.

Ключевые слова: автономный инвертор напряжения, алгоритмы широтно-импульсной модуляции, модулированное выходное напряжение, двоякая трехфазная система, гармоники, спектральный состав.

ВВЕДЕНИЕ

Многофазные, и, в частности, шестифазные регулируемые электроприводы переменного тока обладают рядом преимуществ по сравнению со стандартными трехфазными системами [1]-[2]. К числу перспективных областей применения шестифазных преобразовательных систем относятся в первую очередь электроприводы средней и большой мощности для электротранспорта, для электровозов, для судового тягового привода, и т.п.

В последнее время была предложена новая топология сведенной трехфазной преобразовательной системы на базе четырех стандартных инверторов напряжения, позволяющая увеличить в четыре раза установленную мощность типовой системы на базе регулируемого трехфазного инвертора напряжения [3]. Рис. 1 представляет базовую структуру такой системы, состоящей из двух секций по два инвертора, выходы которых связаны с разомкнутыми обмотками асимметричного шестифазного электродвигателя. В этом случае асинхронный электродвигатель имеет две группы обмоток, пространственно сдвинутых друг относительно друга на 30 электрических градусов.

Для шестифазного мощного транспортного электропривода определенный интерес представляет выполненный в данной статье анализ использования многоуровневых инверторов со средней точкой в цепи источника питания в качестве базовых исполнительных элементов таких систем.

СИНХРОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ ИНВЕРТОРОВ ШЕСТИФАЗНОЙ СИСТЕМЫ

На рис. 2 представлена структура силовых цепей инвертора со средней точкой в цепи источника питания. Каждое плечо такого инвертора содержит четыре вентиля, четыре обратных диода и два отсекающих диода. На рис. 3 представлена векторная диаграмма состояний ключей. В общем случае существует 27 различных состояний ключей инвертора, обозначенных большими и малыми стрелками на рис. 3. Известно также, что использование в схеме управления семи векторов напряжения, $V_1 - V_7$, обозначенных

на рис. 3 большими стрелками, предотвращает формирование нежелательного напряжения нулевой последовательности в трехфазной нагрузке [4].

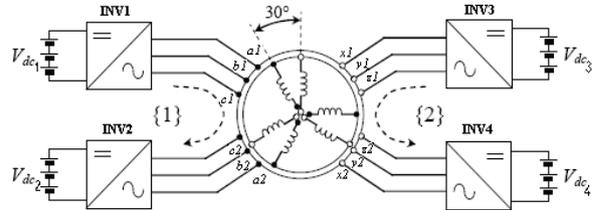


Рис. 1. Топология шестифазной системы электропривода переменного тока на базе четырех инверторов.

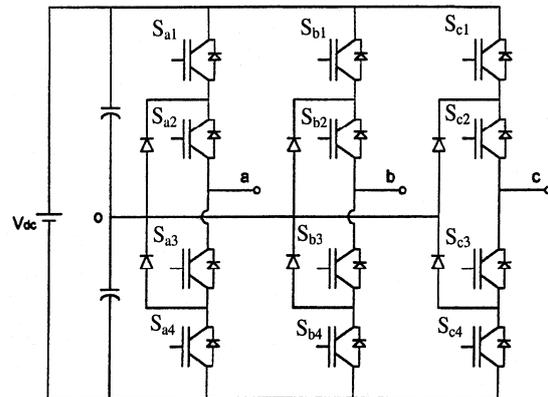


Рис. 2. Структура силовых цепей многоуровневого инвертора со средней точкой в цепи источника питания.

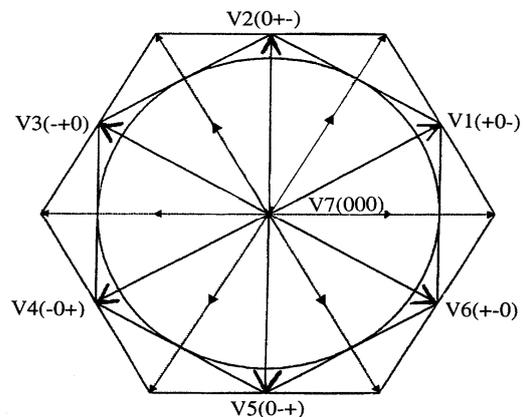


Рис. 3. Векторная диаграмма состояний ключей многоуровневого инвертора.

Три базовых состояния (+,0,-) для каждой из трех фаз инвертора могут быть записаны в
 + if S_1, S_2 are **ON** and S_3, S_4 are **OFF**;
 0 if S_2, S_3 are **ON** and S_1, S_4 are **OFF**;
 - if S_3, S_4 are **ON** and S_1, S_2 are **OFF**.

В этом случае соответствующие состояния ключей для каждого из семи базовых векторов могут быть представлены как:

$$V_1(+0-); V_2(0+-); V_3(-+0); V_4(-0+);$$

$$V_5(0-+); V_6(+ -0); V_7(000).$$

На рис. 4 – 5 показаны временные диаграммы состояния ключей, полярные напряжения V_a и V_b , и линейное напряжение V_{ab} инвертора со средней точкой в цепи источника питания, регулируемого на базе двух схем синхронной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), обеспечивающих устранение напряжения нулевой последовательности. На рис. 4 приведены соответствующие кривые на периоде выходной частоты для инвертора с прямой схемой синхронной векторной модуляции [4], на рис. 5 представлены аналогичные кривые для инвертора с алгоритмами прерывистой синхронной модуляции [4].

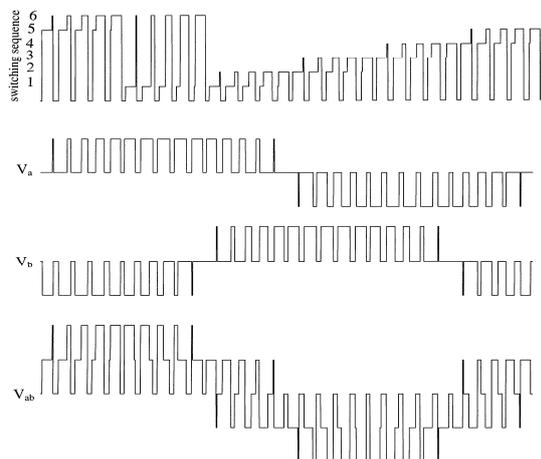


Рис. 4. Управляющие сигналы и формы выходного напряжения многоуровневого инвертора с прямой синхронной модуляцией.

Метод синхронной векторной модуляции, адаптированный применительно к использованию в инверторах со средней точкой в цепи источника питания [4], позволяет обеспечить синхронное и

общем виде как:

симметричное регулирование выходного напряжения как на выходе каждого инвертора многоинверторной системы, так и результирующего фазного напряжения на обмотках асинхронного электродвигателя (рис. 1).

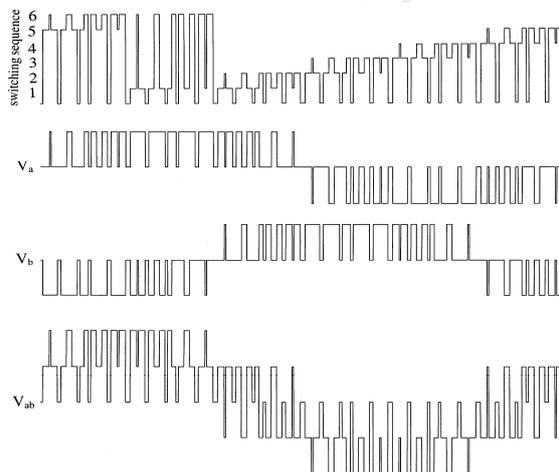


Рис. 5. Управляющие сигналы и формы выходного напряжения многоуровневого инвертора с прерывистой синхронной модуляцией.

В частности, фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в системе на базе четырех инверторов со средней точкой в цепи источника питания (рис. 1 – 2) с упомянутой специализированной схемой управления (рис. 3), определяются в соответствии с (1)-(2) [5]:

$$V_{as} = V_{a1} - V_{a2} \quad (1)$$

$$V_{xs} = V_{x1} - V_{x2}, \quad (2)$$

где V_{a1} , V_{a2} , и V_{x1} , V_{x2} – соответствующие полярные напряжения в системе (рис. 1).

В качестве иллюстрации процессов в шестифазной преобразовательной системе на базе четырех инверторов со средней точкой в цепи источника питания, регулируемых на базе алгоритмов синхронной ШИМ и питающихся от источников с одинаковыми напряжениями ($V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$ в этом случае), на рис. 6 – 9 показаны базовые напряжения в системе (полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} , V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} (со спектрами напряжений V_{as} (V_{xs}))). Данные, приведенные на рис. 6–7, иллюстрируют процессы в системе с прямой схемой синхронной модуляции (DDPWM,

[6]), а на рис. 8–9 показаны аналогичные диаграммы для системы с прерывистой синхронной ШИМ (DPWM [6]). Выходная частота и частота коммутации вентиля при этом соответственно равны $F = 38\text{Hz}$ и $F_s = 1\text{kHz}$, коэффициент модуляции всех инверторов равен $m_1=m_2=m_3=m_4=0.76$ в этом случае. Представленные на рис. 7 и 9 спектрограммы подтверждают факт отсутствия в спектре напряжения субгармоник.

В случае, если питание в системе осуществляется от двух изолированных источников постоянного тока с напряжениями V_{dc1} и V_{dc3} (при этом $V_{dc1}=V_{dc2}$ и $V_{dc3}=V_{dc4}$ на рис. 1), для обеспечения равенства первых гармоник фазных напряжений двух инверторных групп (при скалярном $V/F=const$ регулировании системы), необходимо обеспечить линейные соотношения между коэффициентами модуляции четырех инверторов и относительными величинами напряжений источников питания:

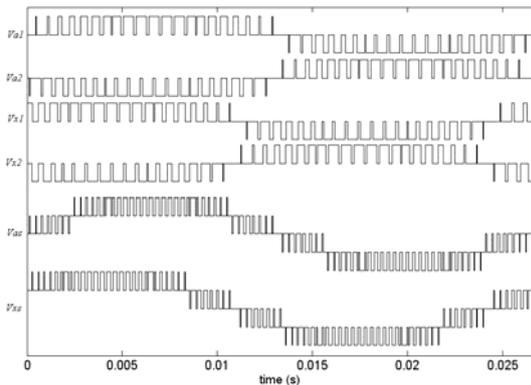


Рис. 6. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прямой синхронной ШИМ ($F=37\text{Hz}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.76$, $F_s=1\text{kHz}$).

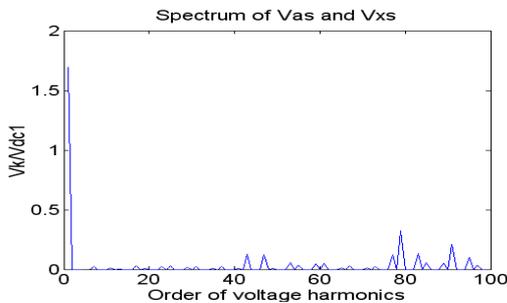


Рис. 7. Спектр напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прямой синхронной ШИМ ($F=37\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

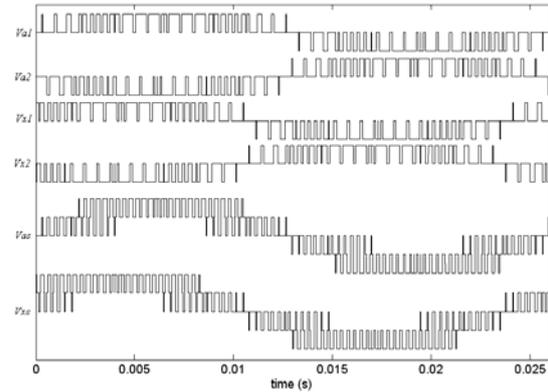


Рис. 8. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=37\text{Hz}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.76$, $F_s=1\text{kHz}$).

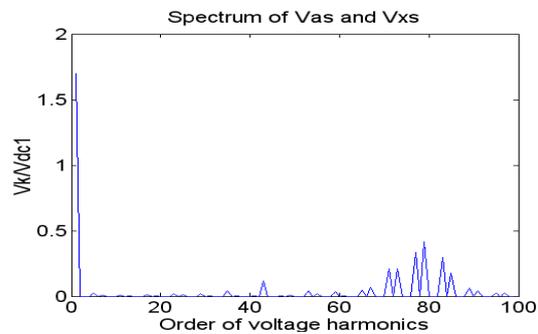


Рис. 9. Спектр напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=37\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$), $m_1V_{dc1} = m_2V_{dc1} = m_3V_{dc3} = m_4V_{dc3}$.

Временные диаграммы и спектрограммы, приведенные на рис. 10–13, иллюстрируют работу системы в данном режиме ($V_{dc3} = 0.7V_{dc1}$, $F = 30\text{Hz}$, $F_s = 1\text{kHz}$, $m_1=m_2=0.6$, $m_3=m_4=0.86$).

В случае, если питание в системе осуществляется от трех изолированных источников с напряжениями $V_{dc1} = V_{dc2}$, V_{dc3} и V_{dc4} , для обеспечения равенства первых гармоник фазных напряжений двух инверторных групп (при скалярном $V/F=const$ регулировании системы), необходимо обеспечить следующие соотношения: $m_1V_{dc1} = m_2V_{dc1} = m_3(V_{dc3} + V_{dc4})/2 = m_4(V_{dc3} + V_{dc4})/2$.

Временные диаграммы и спектрограммы, приведенные на рис. 14–17, иллюстрируют работу системы в данном режиме ($V_{dc4} = 0.5V_{dc3}$, $V_{dc1} = V_{dc2} = 0.8V_{dc3}$, $F = 35\text{Hz}$, $F_s = 1\text{kHz}$, $m_1=m_2=0.7$, $m_3=m_4=0.74$).

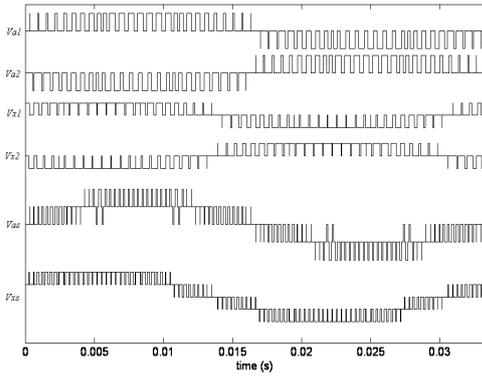


Рис. 10. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прямой синхронной ШИМ ($F=30\text{Hz}$, $V_{dc3}=V_{dc4}=0.7V_{dc1}=0.7V_{dc2}$, $m_1=m_2=0.6$, $m_3=m_4=0.86$, $F_s=1\text{kHz}$).

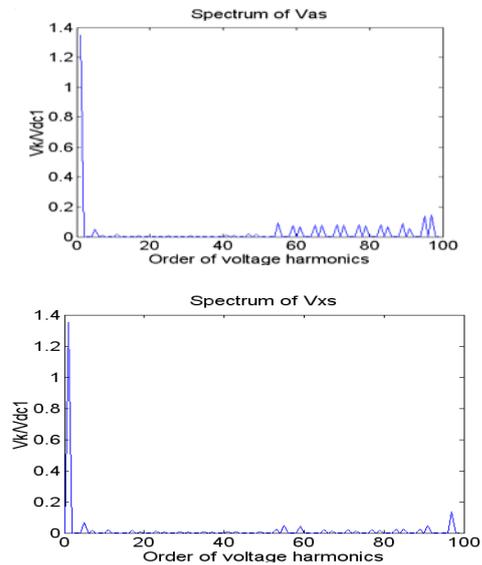


Рис. 11. Спектры напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прямой синхронной ШИМ ($F=30\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

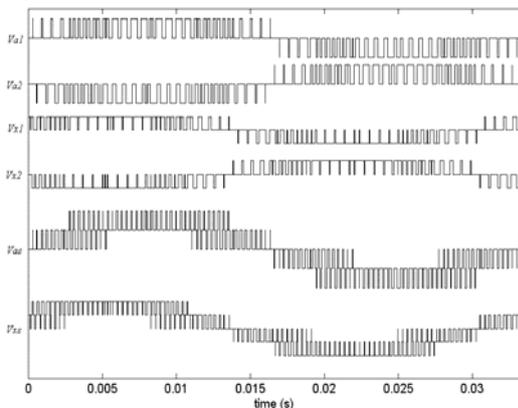


Рис. 12. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=30\text{Hz}$, $V_{dc3}=V_{dc4}=0.7V_{dc1}=0.7V_{dc2}$, $m_1=m_2=0.6$, $m_3=m_4=0.86$, $F_s=1\text{kHz}$).

На рис. 18–21 представлены временные диаграммы и спектрограммы, иллюстрирующие функционирование шестифазной системы на базе четырех инверторов с прерывистой синхронной ШИМ в зоне сверхмодуляции (соответственно на первом этапе (рис. 18–19, $F=47\text{Hz}$), и на втором этапе (рис. 20–21, $F=49\text{Hz}$) регулирования в зоне сверхмодуляции ($V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$ в данном случае).

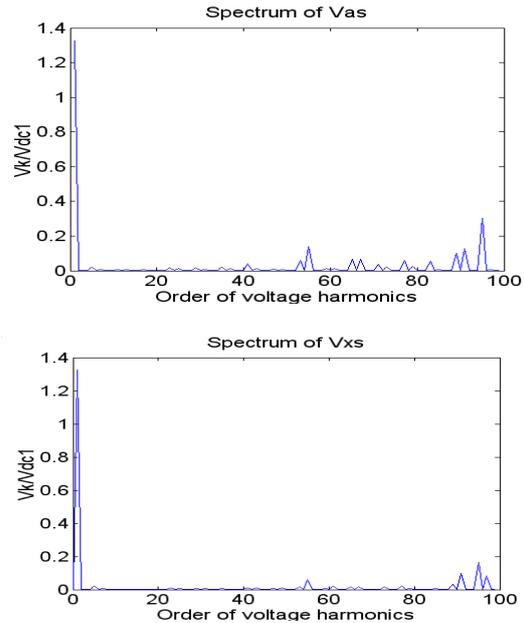


Рис. 13. Спектры напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=30\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

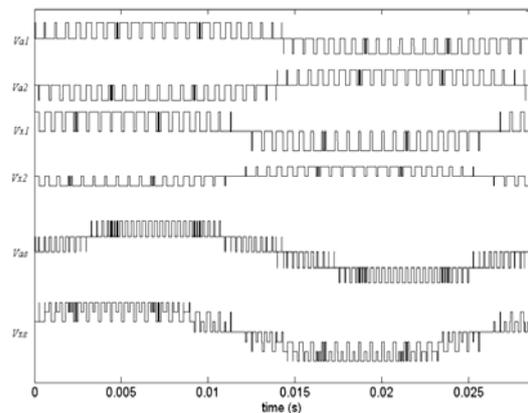


Рис. 14. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прямой синхронной ШИМ ($F=35\text{Hz}$, $V_{dc4}=0.5V_{dc3}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=0.8V_{dc3}$, $m_1=m_2=0.7$, $m_3=m_4=0.74$, $F_s=1\text{kHz}$).

Представленные на рис. 6–21 временные диаграммы и спектрограммы подтверждают

тот факт, что в шестифазной системе на базе четырех инверторов со средней точкой в цепи источника питания алгоритмы синхронной ШИМ обеспечивают симметрию фазных выходных напряжений, в спектре которых на всем диапазоне регулирования отсутствуют четные гармоники и субгармоники.

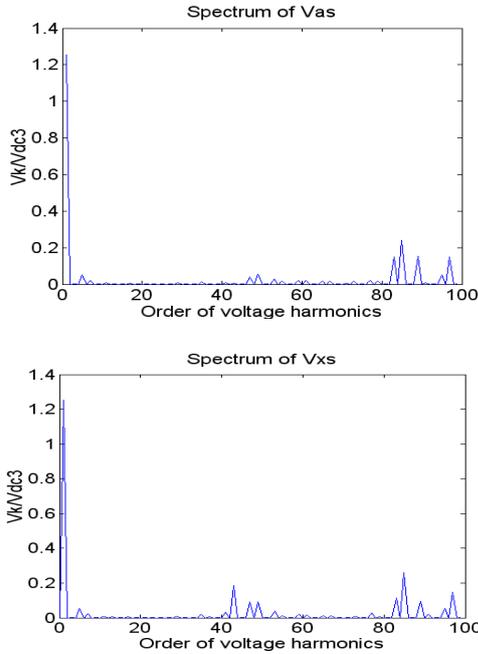


Рис. 15. Спектры напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прямой синхронной ШИМ ($F=35\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

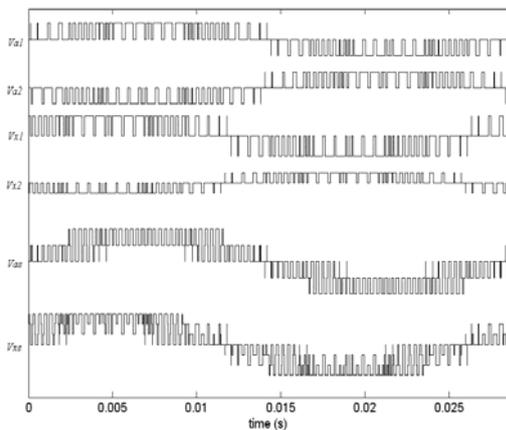


Рис. 16. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35\text{Hz}$, $V_{dc4}=0.5V_{dc3}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=0.8V_{dc3}$, $m_1=m_2=0.7$, $m_3=m_4=0.74$, $F_s=1\text{kHz}$).

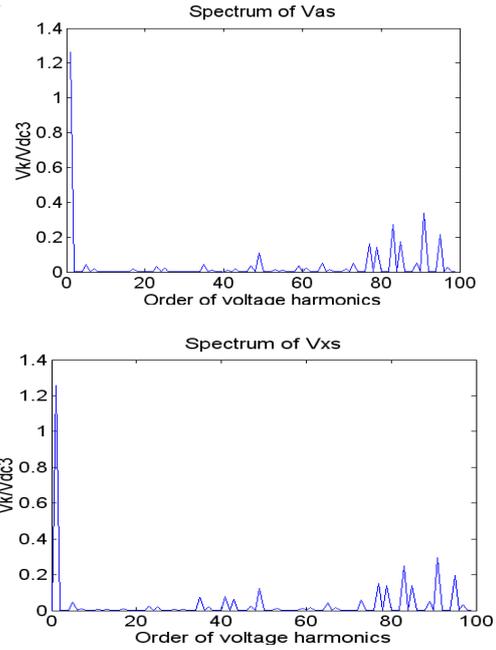


Рис. 17. Спектры напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=35\text{Hz}$, $F_s=1\text{kHz}$).

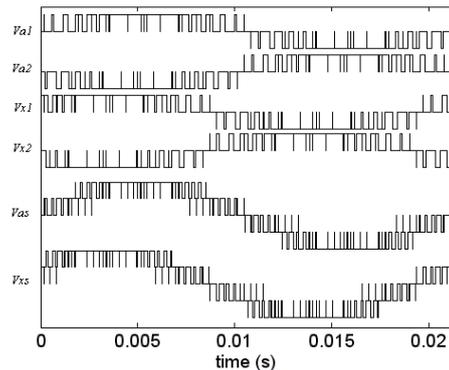


Рис. 18. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ на первом этапе зоны сверхмодуляции ($F=47\text{Hz}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.94$, $F_s=1\text{kHz}$).

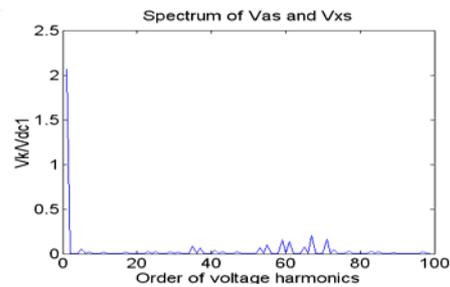


Рис. 19. Спектр напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=47\text{Hz}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.94$, $F_s=1\text{kHz}$).

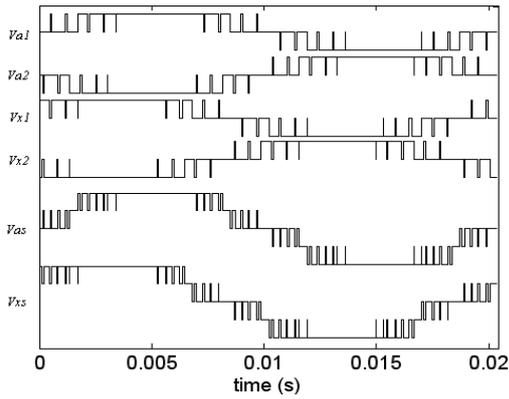


Рис. 20. Полярные напряжения V_{a1} , V_{a2} и V_{x1} , V_{x2} , и фазные напряжения V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ на втором этапе зоны сверхмодуляции ($F=49\text{Hz}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.98$, $F_s=1\text{kHz}$).

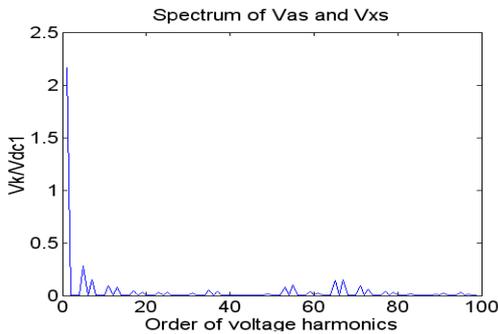


Рис. 21. Спектр напряжений V_{as} и V_{xs} в шестифазной системе с прерывистой синхронной ШИМ ($F=47\text{Hz}$, $V_{dc1}=V_{dc2}=V_{dc3}=V_{dc4}$, $m_1=m_2=m_3=m_4=0.94$, $F_s=1\text{kHz}$).

С целью сопоставления характеристик асимметричной шестифазной системы на базе двух инверторов со средней точкой в цепи источника питания (стандартная топология системы), и на базе четырех инверторов, выполнен расчет взвешенного коэффициента искажений ($WTHD$) фазного напряжения V_{as} в

$$WTHD = (1/V_{as_1}) \left(\sum_{k=2}^{1000} (V_{as_k} / k)^2 \right)^{0.5} \quad (3)$$

На рис. 22 представлены результаты подобного сопоставительного анализа для систем с прямой синхронной модуляцией

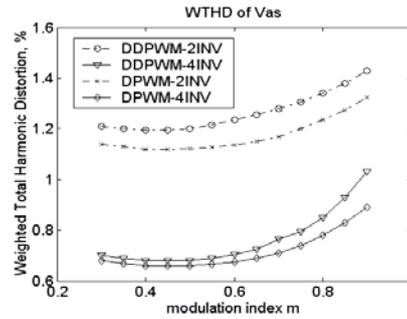


Рис. 22. Усредненная величина взвешенного коэффициента искажений $WTHD$ фазного напряжения V_{as} в функции коэффициента модуляции m для шестифазной системы на базе двух инверторов со средней точкой в цепи источника питания (DDPWM-2INV, DPWM-2INV), и для шестифазной системы на базе четырех инверторов (DDPWM-4INV, DPWM-4INV). (DDPWM), а также для систем с прерывистой синхронной ШИМ (DPWM).

Принято, что напряжения источников электропитания системы равны между собой, при этом коэффициенты модуляции всех инверторов также равны между собой. Режим управления соответствует стандартному скалярному регулированию системы по закону $V/F=const$, средняя частота переключения вентилях каждого инвертора равна $F_s = 1 \text{ kHz}$.

Приведенные на рис. 22 данные показывают, что коэффициент искажений фазного напряжения в шестифазной системе с четырьмя инверторами, регулируемые на базе алгоритмов синхронной ШИМ, на 60-95% меньше, чем для шестифазных схем на базе двух инверторов. При этом использование алгоритмов прерывистой синхронной модуляции в четырехинверторной системе позволяет обеспечить меньшую величину взвешенного коэффициента искажений (до 15%) фазного выходного напряжения по сравнению с соответствующими спектральными характеристиками выходного напряжения системы функции коэффициента модуляции m , регулируемой на базе алгоритмов прямой синхронной модуляции.

Дополнительным преимуществом многофазных схем на базе инверторов со средней точкой в цепи источника питания со специализированной схемой управления, описанной в данном разделе, является возможность уменьшения количества автономных источников питания: вместо четырех источников питания в данном случае

возможно использовать от одного до трех источников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многофазных преобразовательных системах на базе четырех многоуровневых инверторов со средней точкой в цепи источника питания специализированная схема управления инверторами, базирующаяся на использовании минимального числа векторов напряжения, позволяет устранить формирование напряжения нулевой последовательности, благодаря чему появляется возможность уменьшения количества источников электропитания (при этом возможно использовать от одного до трех источников питания, вместо четырех автономных источников, необходимых для типовой шестифазной системы на базе четырех стандартных инверторов). При этом алгоритмы синхронной ШИМ обеспечивают четвертьволновую симметрию форм фазного напряжения в системе, в спектре которого отсутствуют четные гармоники и субгармоники.

Величина взвешенного коэффициента искажений фазного выходного напряжения шестифазной системы асинхронного электропривода с четырьмя инверторами со средней точкой в цепи источника питания на 60-95% ниже, чем для аналогичной системы на базе двух инверторов. При этом использование алгоритмов прерывистой синхронной ШИМ позволяет обеспечить меньшую (до 15%) величину взвешенного коэффициента искажений фазного выходного

напряжения по сравнению с соответствующими интегральными спектральными характеристиками выходного напряжения системы, регулируемой на базе алгоритмов прямой синхронной модуляции.

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

- [1] E. Levi, "Multiphase electric machines for variable speed applications," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 55, n. 5, pp. 1893-1909, 2008.
- [2] V. Oleschuk, R. Bojoi, F. Profumo, A. Tenconi and A.M. Stankovic, "Multifunctional six-phase motor drives with algorithms of synchronized PWM," Proc. of the IEEE Industrial Electronics Conference (IECON'2006), pp. 1293-1300, 2006.
- [3] G. Grandi, A. Tani, P. Sanjeevkumar and D. Ostojic, "Multi-phase multi-level AC motor drive based on four three-phase two-level inverters," Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM'2010), pp. 1768-1775, 2010.
- [4] V. Oleschuk and F. Blaabjerg, "Three-level inverters with common-mode voltage cancellation based on synchronous pulsewidth modulation," Proc. of the IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC'2002), pp. 1439-1444, 2002.
- [5] B.V Reddy, V.T. Somasekhar and Y. Kalyan, "Decoupled space-vector PWM strategies for a four-level asymmetrical open-end winding induction motor drive with waveform symmetries," IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 58, no. 11, pp. 5130-5141, 2011.
- [6] V. Oleschuk, F. Profumo, A. Tenconi, R. Bojoi and A.M. Stankovic, "Cascaded three-level inverters with synchronized space-vector modulation," Proc. of the IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. (IAS'2006), pp. 595-602, 2006.

About authors:



Валентин Олешук (oleschukv@hotmail.com), доктор (хабилитат) техн. наук, главный научный сотрудник Института энергетики АН Молдовы. Областью научных интересов являются стратегии управления и модуляции для силовых преобразователей параметров электрической энергии, для регулируемого электропривода, и для систем возобновляемой энергетики.



Владимир Ермуратский (ermuratskie@gmail.com), доктор (хабилитат) технических наук, главный научный сотрудник ИЭ АГ Молдовы, Область научных интересов: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, силовые полупроводниковые преобразователи, электрические конденсаторы, энергетическая эффективность, теплоэнергетика, теплотехника.