

УДК 621.341.572

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2026-19-1-79-86>

Сравнение основных стратегий управления инвертором напряжения

А. А. Тельнов✉, Ю. Ю. Перевалов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ antel45@yandex.ru

Аннотация. Исследованы основные алгоритмы управления транзисторным инвертором напряжения, различающиеся способом построения контура обратной связи. Рассмотрены пять стратегий стабилизации выходной мощности: широтно-импульсная модуляция (ШИМ) напряжения на входе инвертора, частотно-импульсная модуляция (ЧИМ) сигналов управления (СУ), фазовый сдвиг СУ, симметричная и асимметричная ШИМ СУ. Во второй части статьи представлены эпюры напряжения «затвор–исток» силовых ключей, а также показаны кривые тока и напряжения в диагонали инвертора. Отдельное внимание уделено определению преимуществ и недостатков при выборе той или иной стратегии управления. В заключительной части статьи построен график зависимости КПД инвертора напряжения от глубины регулирования мощности.

Ключевые слова: инвертор напряжения, управление инвертором, ШИМ сигналов управления, ЧИМ сигналов управления, фазовый сдвиг, симметричный ШИМ, асимметричный ШИМ, КПД инвертора

Для цитирования: Тельнов А. А., Перевалов Ю. Ю. Сравнение основных стратегий управления инвертором напряжения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1. С. 79–86. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-79-86.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Comparison of Basic Voltage Inverter Control Strategies

A. A. Telnov✉, Yu. Yu. Perevalov

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ antel45@yandex.ru

Abstract. Explores the main control algorithms for a transistor voltage-gated inverter, each with a different feedback loop design. Five output power stabilization strategies were considered, including pulse-width modulation (PWM) of the inverter input voltage, pulse-frequency modulation (PFM) of the control signals (CS), phase shift of the CS, and symmetrical and asymmetrical PWM of the CS. The second half of the article presents gate-to-source voltage waveforms for the power switches, as well as current and voltage curves across the inverter diagonal. Special attention is given to identifying the advantages and disadvantages of selecting a particular control strategy. The final section of the paper plots the efficiency of the voltage-gated inverter versus the power regulation depth.

Keywords: voltage inverter, inverter control, PWM control signals, PFM control signals, phase shift, symmetrical PWM, asymmetrical PWM, inverter efficiency

For citation: Telnov A. A., Perevalov Yu. Yu. Comparison of Basic Voltage Inverter Control Strategies // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 1. P. 79–86. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-79-86.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

К общепринятым стратегиям построения системы управления комплексами электромагнитной обработки можно отнести: частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ); фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ) коммутации с фазовым сдвигом; ФАПЧ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выпрямленного напряжения; ФАПЧ с симметричной или несимметричной ШИМ сигналов управления [1]. Каждая из этих стратегий имеет свои достоинства и недостатки.

На рис. 1 представлена структурная схема комплекса электромагнитной обработки материалов с частотно-импульсной модуляцией (ЧИМ) сигналов управления, которая состоит из неуправляемого выпрямителя, выполненного на диодах VD1–VD6; выходного фильтрующего конденсатора C1; полномостового инвертора напряжения, состоящего из четырех управляемых вентилях VT1–VT4 с встречно-параллельными диодами VD7–VD10; конденсатора C2, компенсирующего реактивную мощность индуктора; датчика тока; трансформатора T1; датчика напряжения; колебательного контура нагрузки, состоящего из резистора R1, индуктивности L1 и конденсатора C3, где элементы L1 и R1 выступают в качестве схемы замещения индуктора; устройства умножения; датчика температуры; регулятора, обеспечивающего поддержание заданных параметров комплекса; генератора, управляемого напряжением (ГУН); логического элемента НЕ, выполняющего операцию логического отрицания, и драйверов 1, 2, предназначенных для усиления управляющих сигналов и их гальванической развязки. В случае частотно-импульсной модуляции управляющих сигналов поддержание требуемых параметров комплек-

са электромагнитной обработки осуществляется посредством изменения частоты коммутации силовых вентилях, где в качестве стабилизируемых величин выступают ток, напряжение, мощность в индукторе или температура нагрева.

Для лучшей визуализации схемы множество параллельно идущих электрических цепей изображено в виде группового соединения – шины. Цифрами 1–4 показаны единичные проводники, входящие в шину и соединяющие соответствующие узлы схемы, напряжения в диагонали инвертора 5, 6.

К недостаткам данной структуры управления относятся: широкий спектр высокочастотных помех во входных цепях инвертора напряжения, что затрудняет обеспечение электромагнитной совместимости комплекса с другими техническими средствами; наличие высоких коммутационных потерь в транзисторах инверторного моста; низкая эффективность преобразования магнитных компонентов при увеличении частоты, что объясняется ростом высокочастотных потерь в сердечнике и медных проводниках.

К достоинствам данной схемы можно отнести простоту реализации системы управления и наличие неуправляемого выпрямителя.

На рис. 2 представлена структурная схема с фазовой автоподстройкой частоты коммутации (ФАПЧ) и фазовым сдвигом сигналов управления транзисторами инверторного моста. Здесь, в отличие от рассмотренной ранее схемы, добавлены следующие элементы системы управления: датчик перехода через ноль – отслеживает момент перехода синусоидального тока, протекающего по первичной обмотке трансформатора T1, через уровень 0A; детектор фазы – устройство, осу-

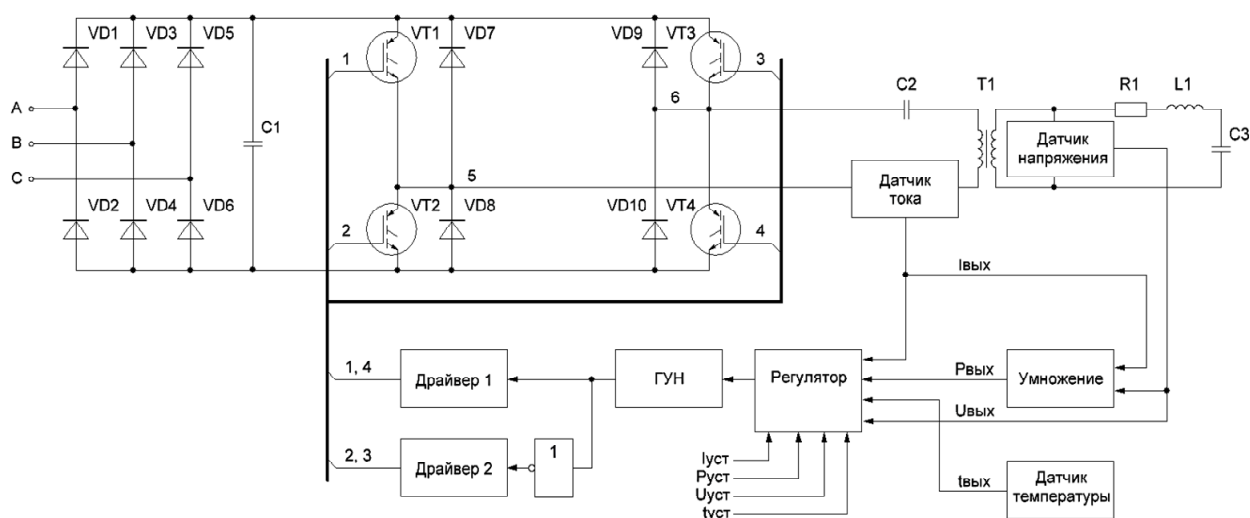


Рис. 1. Комплекс электромагнитной обработки материалов с ЧИМ
Fig. 1. The complex of electromagnetic processing of materials with PFM

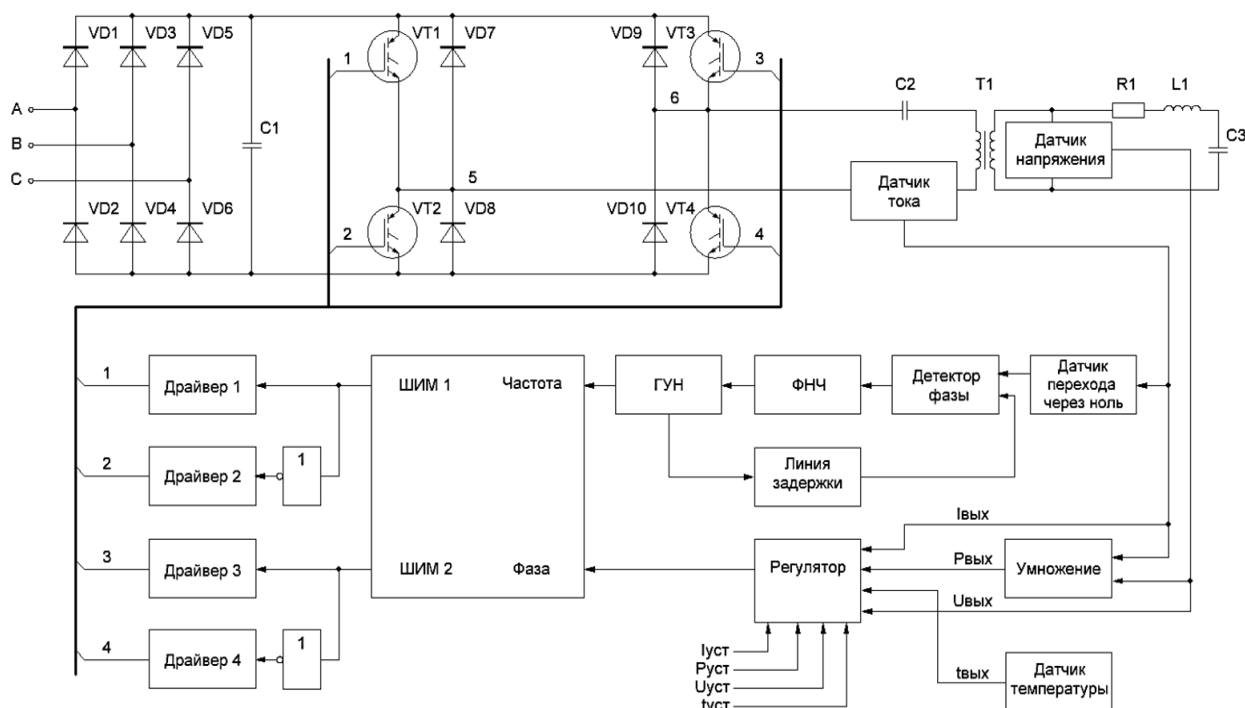


Рис. 2. Комплекс электромагнитной обработки материалов с ФАПЧ и фазовым сдвигом сигналов управления

Fig. 2. A complex of electromagnetic materials processing with PLL and phase shift of control signals

шествяющее сравнение двух входных частот и формирующее выходной сигнал, длительность которого пропорциональна этой разности; фильтр низких частот (ФНЧ) – служит для ослабления высокочастотной составляющей выходного сигнала детектора фазы; генератор, управляемый напряжением (ГУН), – настраивает частоту работы инвертора напряжения на частоту, близкую к резонансной частоте колебательного контура нагрузки; линия задержки – формирует задержку между входными сигналами детектора фазы с целью обеспечения индуктивного режима рассогласования управляющих сигналов; блок, обеспечивающий фазовый сдвиг сигналов управления, имеющий в качестве выходных клемм выводы ШИМ 1 и ШИМ2, а в качестве входных – частоту и фазу соответственно; логический элемент НЕ, подключенный к выводу ШИМ2, выполняет операцию логического отрицания; драйверы 3 и 4 предназначены для усиления управляющих сигналов и их гальванической развязки.

К недостаткам данного способа управления следует отнести: ухудшение энергоэффективности комплекса электромагнитной обработки при снижении выходной мощности инвертора напряжения; наличие ФНЧ в контуре ФАПЧ, уменьшающего быстродействие системы управления.

Достоинства такой системы – работа транзисторов инверторного моста на фиксированной частоте, что облегчает контроль электромагнит-

ных помех и увеличивает эффективность преобразования магнитных компонентов; отсутствие управляемого выпрямителя [2].

На рис. 3 представлена структурная схема с ФАПЧ коммутации транзисторов и ШИМ выпрямленного напряжения.

В данном случае структурная схема отличается наличием транзисторного ключа VT1, осуществляющего регулирование выпрямленного напряжения, и введением дополнительного драйвера 3, предназначенного для усиления и гальванической развязки управляющих сигналов с блока ШИМ.

К наиболее существенным недостаткам данного способа управления относятся: наличие кондуктивных помех во входных цепях комплекса электромагнитной обработки; низкое быстродействие системы управления, объясняемое наличием фильтра низких частот (ФНЧ) в контуре ФАПЧ, а также отсутствием связи между частотами переключения вентилях VT2–VT5 и коммутации VT1 на входе преобразователя; введение дополнительного полупроводникового элемента VT1 уменьшает надежность комплекса в целом. К достоинствам – коммутация транзисторов электромагнитного комплекса на фиксированных частотах, что облегчает контроль электромагнитных помех и увеличивает эффективность работы точных изделий.

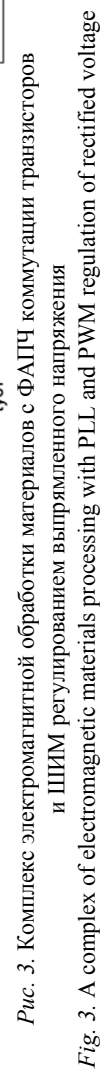


Fig. 3. A complex of electromagnetic materials processing with PLL and PWM regulation of rectified voltage

На рис. 4 представлена структурная схема комплекса электромагнитной обработки материалов с ФАПЧ и симметричной ШИМ сигналов управления. Отличительной особенностью данной структуры служит наличие двухконтурной системы обратной связи, где внутренний контур служит для поддержания выходной мощности инвертора, а внешний устанавливает опорное напряжение ПИ-регулятора 1 в зависимости от стабилизируемого параметра – тока, напряжения индуктора или температуры нагрева. В отличие от предыдущих случаев, система управления дополнена блоками: фильтр низких частот – для ослабления высокочастотной составляющей выходного сигнала устройства умножения; ПИ-регулятор 1. В качестве основных недостатков данной схемы можно выделить: низкую энергоэффективность комплекса при снижении выходной мощности инвертора и наличие ФНЧ, что уменьшает быстродействие системы управления.

К достоинствам относятся: коммутация транзисторов инверторного моста на фиксированной частоте, что облегчает контроль электромагнитных помех и увеличивает эффективность преобразования магнитных компонентов; отсутствие управляемого выпрямителя; наличие двухконтурной систе-

мы обратной связи, которая обеспечивает более стабильный режим работы комплекса в целом.

На рис. 5 представлена структурная схема комплекса электромагнитной обработки материалов с ФАПЧ и несимметричной ШИМ сигналов управления.

Отличительная особенность данной структуры – возможность изменения режима работы комплекса электромагнитной обработки регулированием длительности управляющих сигналов только одного плеча инвертора напряжения. Достоинства данной схемы аналогичны преобразователю с ФАПЧ и симметричной ШИМ сигналов управления, однако отсутствует недостаток в виде снижения энергоэффективности комплекса при уменьшении выходной мощности инвертора [3]. В тоже время, у данной стратегии есть нежелательная особенность – зависимость положения начальных фаз между напряжением в диагонали инвертора (узлы 5, 6) и его первой гармоникой от угла рассогласования управляющих сигналов, что требует увеличения минимального фазового рассогласования, необходимого для индуктивной коммутации транзисторов.

Эпюры сигналов управления, а также кривые тока и напряжения в диагонали инвертора для рассмотренных случаев представлены на рис. 6.

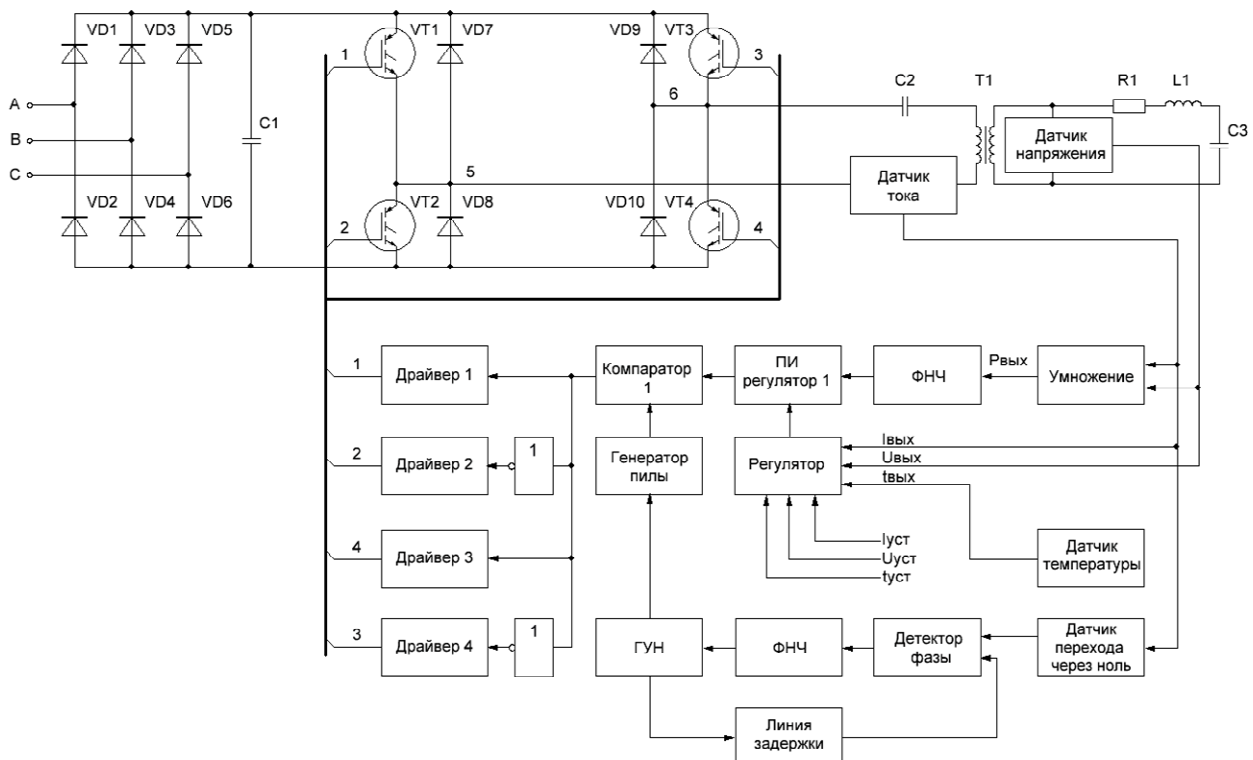


Рис. 4. Комплекс электромагнитной обработки материалов с ФАПЧ и симметричной ШИМ сигналов управления
Fig. 4. A complex of electromagnetic materials processing with PLL and symmetrical PWM control signals

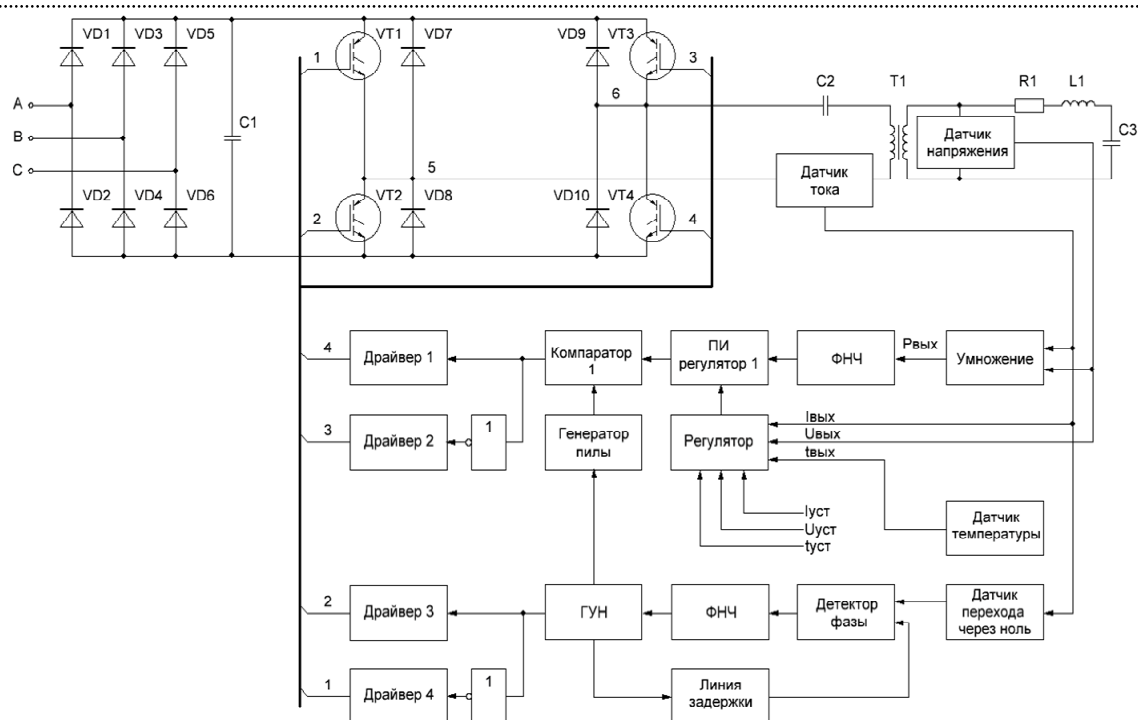
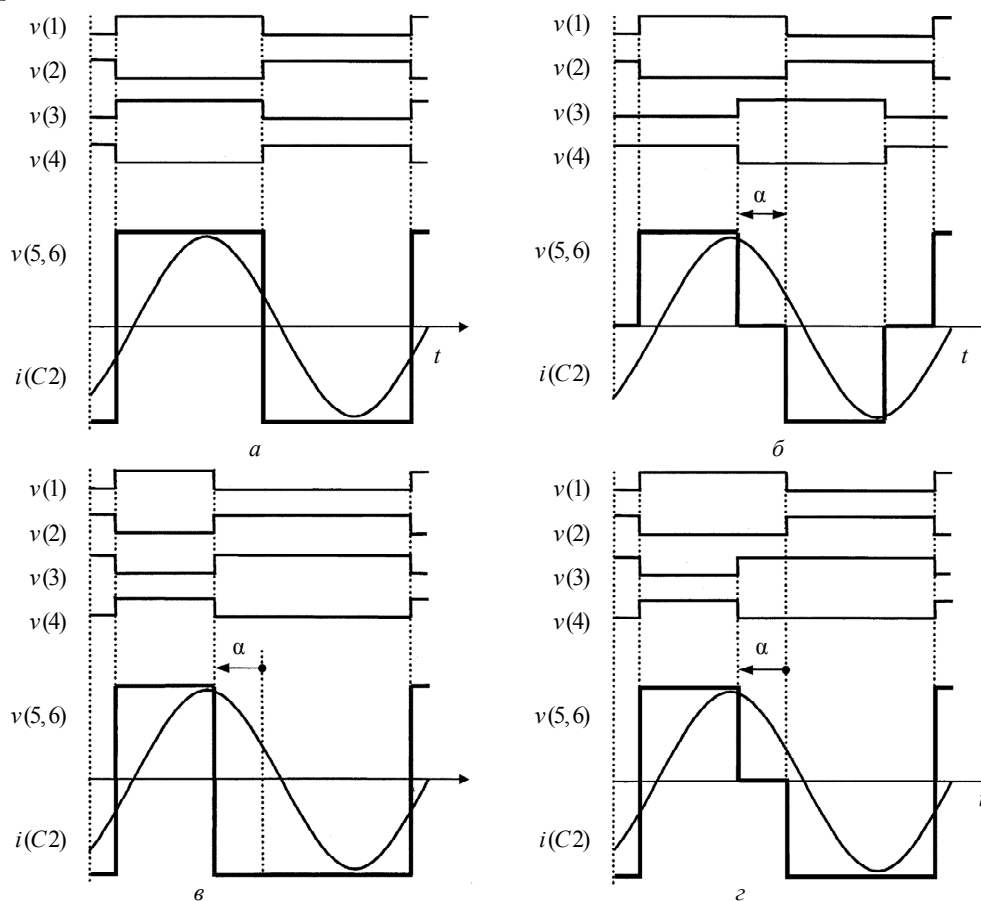


Рис. 5. Комплекс электромагнитной обработки материалов с ФАПЧ и несимметричной ШИМ сигналов управления
Fig. 5. A complex of electromagnetic materials processing with PLL and asymmetrical PWM control signals



$v(1)-v(4)$ – сигналы управления транзисторами VT1–VT4; $v(5, 6)$ – напряжение в диагонали инвертора;
 $i(C2)$ – ток колебательного контура; α – угол рассогласования между импульсами управления

Рис. 6. Эпюры токов и напряжений для способов управления: а – ЧИМ, ФАПЧ и ШИМ регулированием выпрямленного напряжения; б – ФАПЧ с фазовым сдвигом; в – ФАПЧ с симметричной ШИМ; г – ФАПЧ с асимметричной ШИМ
Fig. 6. Diagrams of currents and voltages for control methods: а – PFM, PLL and PWM regulation of rectified voltage;
б – PLL with phase shift; в – PLL with symmetrical PWM; г – PLL with asymmetrical PWM

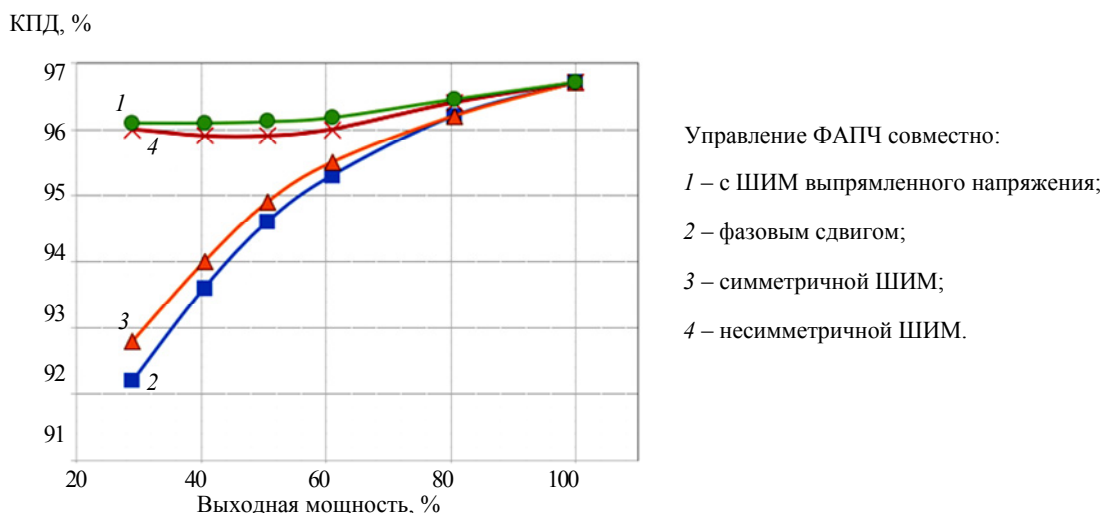


Рис. 7. График сравнения энергоэффективности комплекса электромагнитной обработки для четырех стратегий управления
 Fig. 7. Graph comparing the energy efficiency of an electromagnetic treatment complex for four control strategies

График сравнения энергоэффективности комплекса электромагнитной обработки от изменения уровня выходной мощности, полученный Spice-моделированием, для четырех стратегий управления транзисторами инвертора напряжения представлен на рис. 7.

В ходе проведения компьютерного моделирования работа инвертора напряжения для рассмотренных стратегий управления осуществлялась

при постоянной частоте переключения ключевых элементов, поэтому вынесение на график результатов, полученных для способа с ЧИМ сигналов управления, нецелесообразно. Из вида кривых на рис. 7 следует, что наивысшее значение КПД преобразователя достигается при совместной работе ФАПЧ с ШИМ регулированием выпрямленного напряжения и ФАПЧ с несимметричной ШИМ сигналов управления.

Список литературы

1. Jain P. K., St-Martin A., Edwards G. Asymmetrical pulse-width-modulated resonant DC/DC converter topologies // Proc. of IEEE Power Electronics Specialist Conf. (PESC). IEEE, 1993. P. 818–825.
2. A comparison study of fixed-frequency control strategies for ZVS DC/DC series resonant converters // J. M. Burdío, F. Canales, P. M. Barbosa, F. C. Lee // Proc.

of IEEE Power Electron. Specialist Conf. (PESC). IEEE, 2001. P. 427–432.

3. Dual mode phase-shifted ZVS-PWM series load resonant high-frequency inverter for induction heating super heated steamer / H. Sugimura, H. Muraoka, T. Ahmed, S. Chandhaket, E. Hiraki, M. Nakaoka, H. W. Lee // J. of Power Electronics. 2004. Vol. 4, no. 3. P. 138–151.

Информация об авторах

Тельнов Андрей Александрович – студент гр. 0931 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
 E-mail: antel45@yandex.ru

Перевалов Юрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».
 E-mail: yyperevalov@yandex.ru

References

1. Jain P. K., St-Martin A., Edwards G. Asymmetrical pulse-width-modulated resonant DC/DC converter topologies // Proc. of IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC). IEEE, 1993. P. 818–825.

2. A comparison study of fixed-frequency control strategies for ZVS DC/DC series resonant converters // J. M. Burdío, F. Canales, P. M. Barbosa, F. C. Lee // Proc. of IEEE Power Electron. Specialist Conf. (PESC). IEEE, 2001. P. 427–432.

3. Dual mode phase-shifted ZVS-PWM series load resonant high-frequency inverter for induction heating super heated steamer / H. Sugimura, H. Muraoka, T. Ahmed,

S. Chandhaket, E. Hiraki, M. Nakaoka, H. W. Lee // J. of Power Electron. 2004. Vol. 4, no. 3. P. 138–151.

Information about the authors

Andrey A. Telnov – student gr. 0931 of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: antel45@yandex.ru

Yuri Yu. Perevalov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnology and Converter Engineering (ETPT) of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: yyperevalov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 09.08.2025; принята к публикации после рецензирования 27.11.2025; опубликована онлайн 29.01.2026.

Submitted 09.08.2025; accepted 27.11.2025; published online 29.01.2026.
