

## Анализ энергоэффективности алгоритмов управления преобразователем высоковольтного частотно-регулируемого привода

А.А. Коротков, А.Б. Виноградов  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: vector@drive.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Повышение энергоэффективности (снижение потерь энергии) высоковольтных преобразователей средствами управления становится все более актуальным. Существующие методики управления каскадными преобразователями не решают вопрос комплексной оптимизации управления преобразователем в составе высоковольтного частотно-регулируемого привода и оценки его энергоэффективности.

**Материалы и методы:** Расчеты выполнены на основе компьютерного моделирования с использованием методов цифровой обработки сигналов (дискретное преобразование Фурье).

**Результаты:** Разработан алгоритм векторного ШИМ-управления высоковольтным каскадным преобразователем частоты с уменьшенными коммутационными потерями. Дан сравнительный анализ энергоэффективности алгоритмов управления, проведенный по предложенной методике на основе результатов моделирования высоковольтного электропривода.

**Выводы:** Разработанный векторный алгоритм ШИМ-управления обеспечивает снижение потерь в системе «высоковольтный преобразователь – двигатель» за счет оптимизации алгоритма переключений силовых ключей.

**Ключевые слова:** высоковольтный преобразователь, регулируемый электропривод, векторное ШИМ-управление, энергоэффективность.

## Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms of Variable-Frequency Drive High Voltage Converter

A.A. Korotkov, A.B. Vinogradov  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: vector@drive.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Energy efficiency enhancement (reduction of energy losses) of high voltage converters by means of control strategy is becoming more topical. The existing control strategies of cascade converters (SCHB VSC) do not solve the problem of complex optimization of converter control as a part of high voltage variable-frequency drive and its energy efficiency estimation give the comprehensive analysis of high voltage variable-frequency drive and voltage converter control optimization including energy efficiency estimation.

**Materials and methods:** The calculations are based on computer simulation with using the methods of digital signal processing methods (discrete Fourier transform).

**Results:** The article contains the algorithm of Vector Pulse-Weight Modulation (SVPWM) method of controlling the high-voltage cascade frequency converter with reduced switching losses. The comparative analysis of energy efficiency of control strategies based on the proposed procedure with taking into account the simulation results of high voltage electric drive is given.

**Conclusions:** The developed new SVPWM algorithm ensures the losses decreasing in «high voltage converter – motor» system due to optimization algorithm of power keys switching procedure.

**Key words:** high voltage converter, variable frequency drive, PWM method, energy efficiency.

Модернизация любой отрасли промышленности, народного хозяйства неразрывно связана с внедрением новых перспективных технологий и технологических процессов производства, направленных на повышение эффективности и энергосбережение. Приоритетным в развитии любого производства является повышение его энергоэффективности.

Наибольший эффект энергосбережения может быть достигнут переходом на частотно-регулируемый электропривод мощных механизмов [1]. При этом снижается не только энер-

гопотребление за счет задания режимов работы, оптимизированных по технологическому процессу, но и износ механизмов, повышается надежность эксплуатации.

Высоковольтный многоуровневый преобразователь частоты (ВМПЧ) в составе регулируемого электропривода высоковольтных асинхронных и синхронных двигателей получил широкое распространение как основной элемент управления приводом мощных механизмов и энергосбережения в промышленности, электроэнергетике и коммунальном хозяйстве. Эф-

фект энергосбережения в таких системах достигается оптимизацией технологических процессов, снижением динамических нагрузок, а также снижением собственных потерь преобразования энергии.

Довольно много работ посвящено рассмотрению различных схем высоковольтных преобразователей частоты, получивших широкое распространение [2]. Не определено однозначного подхода к выбору алгоритма управления. По-прежнему актуальной остается задача разработки эффективного по потерям в системе «ВМПЧ–двигатель» алгоритма управления, а потенциал оптимизации энергетических характеристик системы средствами управления не исчерпан. Оптимальное управление ВМПЧ должно обеспечивать в комплексе соблюдение требований стандартов качества электроэнергии и максимально высокий КПД преобразователя.

Нами разработан алгоритм векторного ШИМ-управления каскадным многоуровневым преобразователем, оптимизированный по коммутациям, и предложена методика оценки и сравнения энергоэффективности системы «ВМПЧ–двигатель» с различными ШИМ-алгоритмами по критерию минимума потерь.

Методика оценки энергоэффективности предполагает численный расчет основных энергетических показателей на компьютерной модели высоковольтного преобразователя с приводным двигателем. Для этого в среде программирования Delphi7 составлена математическая модель 17-уровневого ВМПЧ каскадной топологии с асинхронным высоковольтным двигателем в качестве нагрузки и проведен комплекс модельных экспериментов, позволяющих показать работоспособность предлагаемого алгоритма и выполнить анализ энергетических показателей в различных режимах работы. Структурная схема экспериментальной компьютерной модели высоковольтного электропривода представлена на рис. 1 и состоит из следующих блоков:

- блок управления (реализует статический закон  $u/f$  - регулирования);
- блок модулятора (за цикл ШИМ формирует выходные сигналы управления ячейками  $U_{yHxi}$  таким образом, чтобы выходное эквивалентное на периоде ШИМ-напряжение мно-

гоуровневого инвертора было равно заданному напряжению  $\bar{U}_z$ );

- блок многоуровневого инвертора (представляет собой модель каскадной топологии, состоящей из 8 (для 17-уровневого) последовательно соединенных ячеек (мостовых инверторов) в каждой фазе преобразователя);

- блок двигателя (представлен моделью высоковольтного асинхронного двигателя АОД-1000-6ДУ1 номинальной мощностью 1000 кВт и напряжением 10 кВ, составленной по уравнениям Парка).

Блок модулятора в системе управления высоковольтным частотно-регулируемым приводом (ВЧРП) включает в себя алгоритмы управления каскадным преобразователем: классический синусоидальный алгоритм ШИМ по методу сдвига по фазе опорных сигналов (PSPWM) и предлагаемый алгоритм векторного управления.

Алгоритм синусоидальной ШИМ [2] с добавлением 1/6 третьей гармоники является классическим и широко используемым алгоритмом управления преобразователями и принимается в качестве базового (исходного) алгоритма для процедуры сравнения.

Разработанный и реализованный в модели алгоритм векторного ШИМ-управления каскадным преобразователем, сравниваемый с базовым синусоидальным алгоритмом, выбирает по диаграмме напряжений три ближайших вектора и рассчитывает для них времена включения за цикл ШИМ. Основываясь на принципе минимума переключений, алгоритм определяет последовательность коммутации векторов и набор оптимальных комбинаций состояний ключей для каждого вектора последовательно. Виртуальная модель ВМПЧ, входящая в состав алгоритма, хранит информацию о состоянии каждой ячейки преобразователя и в реальном времени анализирует и распределяет коммутационную нагрузку по ячейкам в фазе преобразователя, определяя номера коммутируемых ячеек и их состояния до и после коммутации. Универсальность алгоритма заключается в том, что задание числа уровней  $n$  может принимать любое нечетное значение 3,5,7..., не превышающее значение числа уровней, определяемое структурой многоуровневого инвертора.

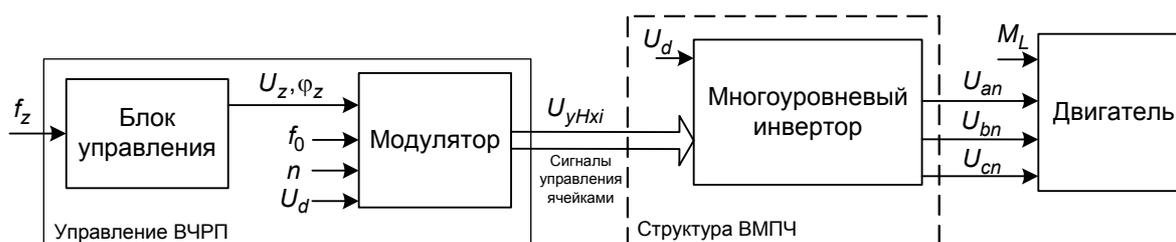


Рис. 1. Структурная схема модели электропривода с высоковольтным преобразователем

Параметры управления, задаваемые в блоке модулятора:

- $f_0$  – частота цикла ШИМ;
- $n$  – заданное число уровней;
- $U_d$  – среднее напряжение в звене всех ячеек ВМПЧ.

Следует отметить, что компьютерная модель преобразователя не рассматривает процессы в трехфазном многообмоточном трансформаторе и подключенных к его вторичным обмоткам выпрямителях, а использует идеальный источник  $U_d$  в звене постоянного напряжения всех ячеек как элемент питания мостового инвертора. Модель мостового инвертора составлена с учетом параметров и характеристик силового модуля SEMiX252GB176HDs фирмы SEMIKRON, использованного при разработке опытного образца ВМПЧ.

Для анализа энергетических показателей сравниваемых алгоритмов модуляции составлена программа модельного эксперимента, которая включает следующие режимы работы электропривода:

*А. Режим на пониженной частоте:* статический режим вращения вала двигателя с частотой  $\omega_r = 41,2$  рад/с и номинальной нагрузкой  $M_L = M_H = 9600$  Нм; задается частота  $f_z = 0,4$   $f_H = 20$  Гц.

*В. Номинальный режим:* статический режим вращения вала двигателя с частотой  $\omega_r = 104$  рад/с и номинальной нагрузкой  $M_L = M_H = 9600$  Нм; задается  $f_z = f_H = 50$  Гц.

*С. Режим на повышенной частоте:* статический режим вращения вала двигателя с частотой  $\omega_r = 207,9$  рад/с и нагрузкой  $M_L = 0,5 M_H = 4800$  Нм; задается частота  $f_z = 2f_H = 100$  Гц.

Оценка энергоэффективности ВМПЧ для сравнения алгоритмов ШИМ-управления выполняется на компьютерной модели (рис. 1) в одинаковых режимах работы, задавая частоту вращения и статический момент на валу двигателя и анализируя потери в преобразователе и двигателе, т.е.  $\Delta P = P_{вх} - P_{мехАД}$ . Величина потерь  $\Delta P$  для каждого алгоритма определяет КПД преобразования энергии. Сравнение энергоэффективности системы для каждого из рассматриваемых алгоритмов ШИМ предлагается выполнять по разработанной методике, включающей расчет следующих энергетических показателей:

- 1) интегрального критерия оценки дополнительных потерь от ШИМ в обмотке двигателя;
- 2) суммарных потерь мощности в силовых IGBT модулях ячеек преобразователя;
- 3) коэффициента искажения синусоидальности напряжения на двигателе, подключенном к выводам преобразователя.

Одним из основных показателей энергоэффективности ШИМ является критерий дополнительных активных потерь в обмотках статора и ротора от коммутационной составляющей ШИМ. Процедура вычисления дополни-

тельных потерь, предложенная в [3], представляет собой усреднение на периоде расчета, кратном периоду основной гармоники, значению квадрата токовой ошибки. Сравнение алгоритмов по критерию дополнительных потерь от ШИМ в системе «ВМПЧ–двигатель» выполняют после приведения к одинаковому числу коммутаций инвертора, оценивая, таким образом, дополнительные потери в двигателе при условии равенства потерь в силовых модулях преобразователя.

Потери в силовом IGBT модуле подразделяют на коммутационные потери и потери проводимости. Коммутационную энергию потерь рассчитывают как сумму энергии коммутационных потерь транзисторов и энергии обратного восстановления диодов для всех переключений на заданном интервале расчета. Потери энергии на проводимость получают на периоде выходного тока, суммируя активные потери всех транзисторов и обратных диодов силового модуля.

Нормативным показателем качества электроэнергии (ПКЭ), определяющим отношение высших гармонических составляющих к основной гармонике, принят коэффициент искажения синусоидальности фазного или линейного напряжения, вычисляемый по 40 первым кратным гармоникам<sup>1</sup>. Нормально и предельно допустимые значения коэффициента для диапазона номинальных напряжений 6–20 кВ составляют соответственно 5 и 8 %.

Предлагаемая нами методика сравнения алгоритмов управления по критерию энергоэффективности сводится к следующим задачам:

1) поиск оптимальных частот модуляции, определяемых по критерию минимума потерь мощности с учетом уровня нормально допустимого коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения, в рабочем диапазоне задания частоты вращения вала;

2) сравнение потерь мощности в преобразователе  $P_{conv}$  в одинаковых рабочих режимах на оптимальных частотах модуляции, соответствующих сравниваемым алгоритмам.

Составлена модель электропривода с высоковольтным 17-уровневым каскадным преобразователем и подключенным к его выводам асинхронным двигателем АОД-1000-6ДУ1. Компьютерное моделирование проводилось согласно разработанной программе модельного эксперимента в режимах А, В, С в диапазоне частот основной гармоники выходного напряжения 10–100 Гц.

<sup>1</sup> ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 1999-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 111, 31 с. (Межгосударственные стандарты).

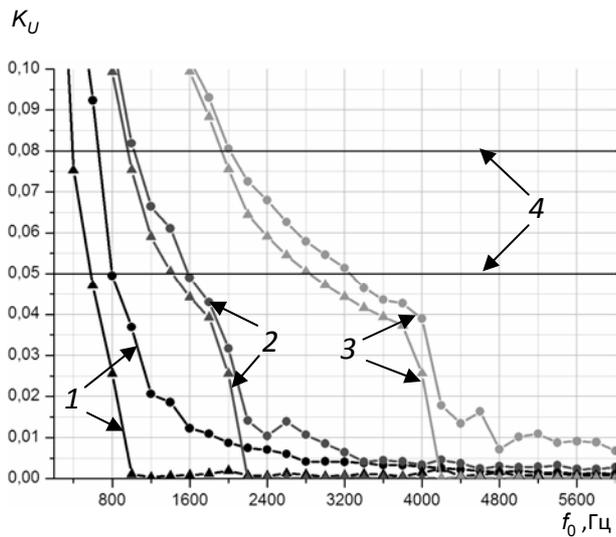


Рис. 2. Зависимости коэффициента искажения синусоидальности от частоты модуляции: 1 – в режиме А; 2 – в режиме В; 3 – в режиме С; 4 – нормально и предельно допустимые уровни

В каждом режиме определен рабочий диапазон частот модуляции по значению коэффициента искажения синусоидальности, не превышающему нормально допустимый уровень 5 %. На рис. 2 минимальная частота модуляции  $f_{0\_min}$  для каждого из сравниваемых алгоритмов определена в точке пересечения кривой  $K_U(f_0)$  уровня 0,05. Далее на всех рисунках приняты следующие обозначения: символом «●» отмечены графики, полученные для ВМГЧ с векторным ШИМ-управлением; символом «▲» – графики, соответствующие синусоидальному алгоритму ШИМ.

Заметим, что влияние близких к основной частоте кратных гармоник выходного напряжения в меньшей степени проявляется с алгоритмом синусоидальной ШИМ, а соответствующий коэффициент искажения синусоидальности, начиная с определенной частоты модуляции (режим А – 1 кГц, режим В – 2,2 кГц, режим С – 4,2 кГц), принимает практически постоянное минимальное значение.

На рис. 3 показаны зависимости потерь в преобразователе от частоты модуляции для сравниваемых алгоритмов в режимах А, В, С.

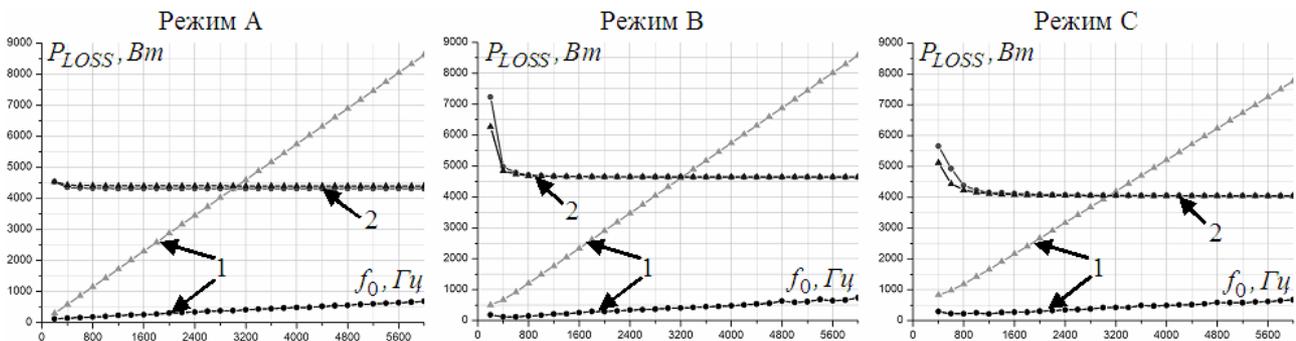


Рис. 3. Зависимости потерь мощности в преобразователе от частоты модуляции в режимах А,В,С: 1 – коммутационные потери; 2 – потери на проводимость

Заметим, что потери проводимости не зависят от частоты модуляции в рабочем диапазоне  $f_0 \geq f_{0\_min}$  и увеличиваются только при снижении частоты до значений ниже минимальной. Коммутационные потери в преобразователе пропорциональны частоте коммутации.

Зависимости суммарных потерь мощности (коммутационные потери и потери проводимости) в преобразователе от частоты модуляции для сравниваемых алгоритмов ШИМ показаны на рис. 4. Заметим, что в рабочем диапазоне частот модуляции составляющая дополнительных потерь от ШИМ в обмотке статора составляет сотые доли процента от общих потерь двигателя. Таким образом, в системе «ВМГЧ–двигатель» суммарные потери в двигателе зависят от режима работы, а не от алгоритма ШИМ-управления.

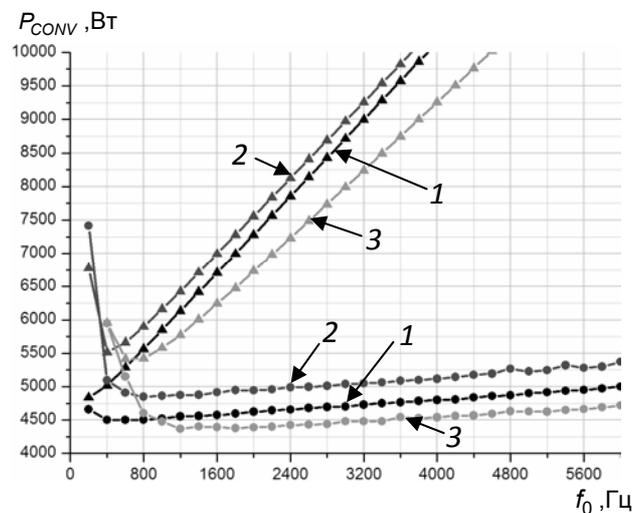


Рис. 4. Зависимости суммарных потерь мощности в преобразователе от частоты модуляции: 1 – в режиме А; 2 – в режиме В; 3 – в режиме С

Оптимальная частота модуляции находится как наибольшая из частот  $f_{0\_min}$  (минимальная в рабочем диапазоне) и  $f_{0\_P\_min}$  (частота минимума суммарных потерь преобразователя (рис. 4)).

Оптимальная частота модуляции  $f_{0\_opt}$  и частота минимума потерь  $f_{0\_P\_min}$  в зависимости от частоты основной гармоники напряжения

для сравниваемых алгоритмов ШИМ показана на рис. 5. Зависимости оптимальных потерь мощности в преобразователе (на частоте  $f_{0\_opt}$ ) и минимальных потерь мощности (на частоте  $f_{0\_P\ min}$ ) показаны на рис. 6. В исследуемом диапазоне основной гармоники 10–100 Гц оптимум потерь в преобразователе с векторным управлением может превысить уровень соответствующих минимальных потерь не более чем на 2,5 %, тогда как с синусоидальным алгоритмом увеличение потерь может составить до 30 %. Таким образом, минимум потерь для векторного ШИМ-алгоритма допустимо считать в точке оптимума.

Отметим, что оптимальные потери преобразователя с векторным управлением меньше соответствующих потерь с синусоидальной ШИМ, а их отношение, в зависимости от режима работы, составляет от 57 до 90 %.

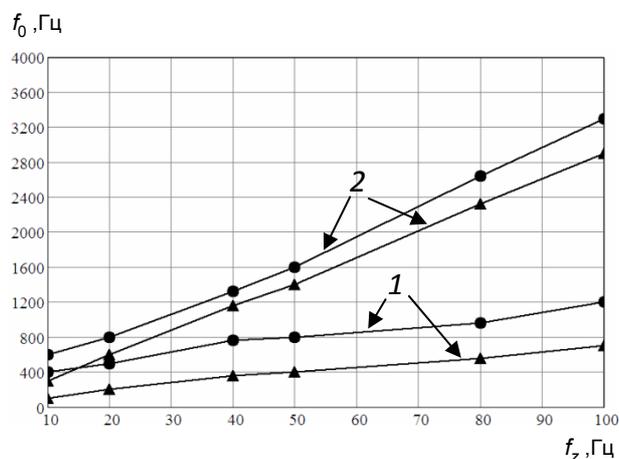


Рис. 5. Зависимости частоты модуляции от частоты основной гармоники напряжения: 1 – значения частоты  $f_{0\_P\ min}$ ; 2 – значения частоты  $f_{0\_opt}$

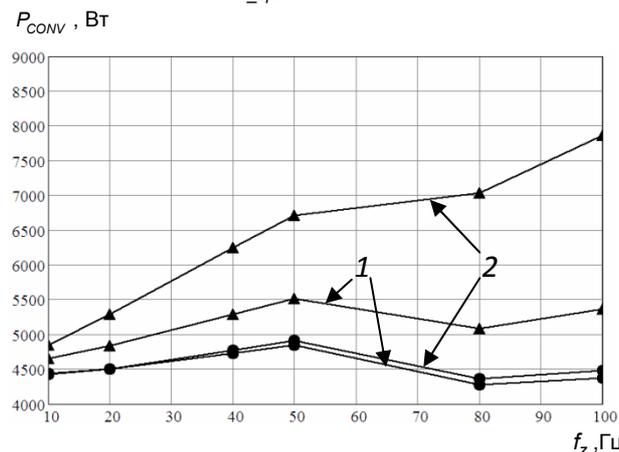


Рис. 6. Зависимости значений общих потерь в преобразователе от частоты основной гармоники напряжения: 1 – на частоте  $f_{0\_P\ min}$ ; 2 – на частоте  $f_{0\_opt}$

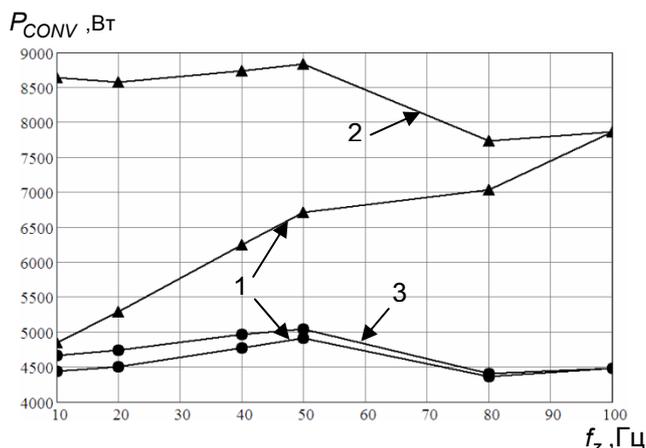


Рис. 7. Зависимости значений общих потерь в преобразователе от частоты основной гармоники напряжения: 1 – на частоте  $f_{0\_opt}$ ; 2 – на частоте 2,9 кГц; 3 – на частоте 3,3 кГц

Для сравниваемых алгоритмов ШИМ на рис. 7 изображены графики потерь при управлении в функции оптимальной частоты модуляции и на постоянной частоте модуляции (3,3 кГц – для векторной ШИМ, 2,9 кГц – для синусоидальной ШИМ). Частоты 3,3 кГц и 2,9 кГц выбраны минимально допустимыми по зависимостям оптимальных частот модуляции в заданном диапазоне управления (рис. 5).

Сравнительный анализ результатов моделирования предложенного векторного ШИМ-алгоритма и традиционной синусоидальной ШИМ позволяет сделать следующие выводы:

1. Диапазон рабочих частот модуляции любого алгоритма ШИМ-управления ограничен снизу нормированным значением коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения, а сверху – быстродействием аппаратной части и оптимизацией программной части алгоритма.

2. В диапазоне рабочих частот модуляции потери в высоковольтном асинхронном двигателе определяются режимом работы и практически не зависят от выбора алгоритма или частоты модуляции. Поэтому дополнительные потери от ШИМ не являются определяющими в силу их малости относительно других составляющих (суммарных потерь мощности в преобразователе).

3. Анализ суммарных потерь в преобразователе, выполненный для сравниваемых алгоритмов ШИМ-управления, показал значительное снижение коммутационной составляющей потерь с векторной ШИМ при равных потерях проводимости.

4. В качестве оптимальной частоты модуляции для ВМПЧ целесообразно принимать наибольшую из частот  $f_{0\_min}$  (минимальная частота в диапазоне рабочих частот) и  $f_{0\_P\ min}$  (частота минимума суммарных потерь в преобразователе). В рассмотренном частном случае, это всегда частота  $f_{0\_min}$ .

5. Оптимальная частота модуляции  $f_{0\_opt}$  векторного алгоритма определяет не только допустимый уровень искажений, но и минимум потерь мощности. Это справедливо только для векторного алгоритма ШИМ. Показано, что оптимальные потери в преобразователе с векторным алгоритмом на 4–16 % (в зависимости от режима работы) меньше минимальных потерь с синусоидальным алгоритмом ШИМ.

6. Слабая зависимость потерь в преобразователе от частоты модуляции для векторного алгоритма, в отличие от синусоидального алгоритма, дает снижение потерь на 43–46 % при управлении на постоянной частоте модуляции во всем диапазоне. Векторное управление в функции частоты модуляции по линейным зависимостям оптимальных частот дает снижение потерь от 8 до 43 %, по сравнению с синусоидальной ШИМ.

Разработанный векторный ШИМ-алгоритм прошел экспериментальную апробацию на макетном образце 17-уровневого каскадного преобразователя, созданного НТЦ Электропривода «Вектор» по заказу ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода, и показал хорошую сходимость с результатами расчетов и моделирования.

*Коротков Александр Александрович,*  
НТЦ Электропривода «Вектор»,  
инженер-программист,  
телефон (4932) 26-97-08,  
e-mail: vector@drive.ispu.ru

*Виноградов Анатолий Брониславович,*  
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, доцент кафедры ЭП и АПУ, научный руководитель НТЦ Электропривода «Вектор»,  
телефон (4932) 26-97-08,  
e-mail: vector@drive.ispu.ru

#### Список литературы

1. **Краснов Д.В., Онищенко Г.Б.** Оценка потребности в высоковольтных регулируемых электроприводах переменного тока // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 1. – С. 73–81.
2. **Колпаков А., Карташев Е.** Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 57–65.
3. **Виноградов А.Б., Изосимов Д.Б.** Анализ энергетических показателей и методика выбора оптимальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции для управления трехфазным инвертором напряжения // Электричество. – 2009. – № 5. – С. 37–41.

#### References

1. Krasnov, D.V., Onishchenko, G.B. Otsenka potrebnosti v vysokovol'tnykh reguliruemyykh elektroprivodakh peremennogo toka [Needs Assessment of High Voltage Regulated Electric Drive of Alternating Current]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2010, issue 3, part 1, pp. 73–81.
2. Kolpakov, A., Kartashev, E. Algoritmy upravleniya mnogourovnevnyimi preobrazovatelayami [The Algorithms Control of Multilevel Converters]. *Silovaya elektronika*, 2009, no. 2, pp. 57–65.
3. Vinogradov, A.B., Izosimov, D.B. Analiz energeticheskikh pokazateley i metodika vybora optimal'nykh algoritmov shirotno-impul'snoy modulyatsii dlya upravleniya trekhfaznym inverterom napryazheniya [Energy Data Analysis and Method of Choosing the Optimal Algorithms of Pulse-width Modulation for Controlling Three-phase Voltage Converter]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 5, pp. 37–41.