УДК 621.314.26:621.372.632

Сравнительный анализ энергетических показателей алгоритмов управления высоковольтным многоуровневым преобразователем

Виноградов А.Б., канд. техн. наук, Сибирцев А.Н. инж., Коротков А.А. инж., Монов Д.А. инж.

Разработан алгоритм векторного управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты с уменьшенными коммутационными потерями. Приведены результаты моделирования высоковольтного электропривода, показывающие преимущества разработанной векторной ШИМ в сравнении с традиционной ШИМ «на пиле». Предложена методика сравнительного анализа энергоэффективности ШИМ алгоритмов управления, основанная на расчёте энергетических показателей.

Ключевые слова: высоковольтный преобразователь, регулируемый электропривод, ШИМ управление, показатель энергоэффективности.

Energy Efficiency Comparative Analysis of High Voltage Source Converter PWM Methods

A.B. Vinogradov, Ph.D., A.N. Sibirtsev, Engineer, A.A. Korotkov, Engineer, D.A. Monov, Engineer

Space Vector Modulation (SVM) method for High Voltage Source Converter with reduced switching loss was developed. The High Voltage drive simulation data that outline the advantage of designed SVM method in comparison with well-known Sine-Triangle Modulation are shown. The procedure of PWM methods energy efficiency comparative analysis, based on energy datum calculation, is suggested.

Key words: High Voltage Converter, controlled-velocity electric drive, PWM methods, energy efficiency index.

Высоковольтный многоуровневый преобразователь частоты (ВМПЧ) в составе регулируемого электропривода высоковольтных асинхронных и синхронных двигателей получил широкое распространение как основной элемент энергосбережения в большинстве отраслей промышленности, электроэнергетики и коммунального хозяйства. Эффект энергосбережения в системах с высоковольтным регулируемым электроприводом достигается оптимизацией технологических процессов, снижением динамических нагрузок и повышения надёжности электрооборудования. Энергоэффективность таких систем определяется также собственными потерями преобразования энергии.

Не смотря на то, что исследованию различных структур и алгоритмов управления высоковольтным преобразователем частоты посвящено довольно много работ, среди которых [1,2,3], задача разработки эффективных по потерям в системе «ВМПЧ-нагрузка» алгоритмов управления по-прежнему актуальна, а потенциал оптимизации энергетических характеристик систем средствами управления не исчерпан. Оптимальное управление ВМПЧ должно обеспечивать в комплексе соблюдение требований стандартов качества электроэнергии и максимально высокий КПД преобразователя.

Авторами статьи разработан алгоритм векторного управления ВМПЧ и предложена методика сравнения энергоэффективности систем «ВМПЧ-нагрузка» с различными ШИМ алгоритмами по критерию минимума потерь. Основная задача работы заключается в составлении математической модели 17-уровневого ВМПЧ каскадной топологии с асинхронным двигателем в качестве нагрузки и проведении на её основе модельных экспериментов, позволяющих показать работоспособность предложенного алгоритма и выполнить анализ энергетических показателей системы «ВМПЧ-двигатель» в различных режимах работы преобразователя. Структура экспериментальной компьютерной модели высоковольтного электропривода представлена на рис.1 и состоит из следующих блоков:

– *блок управления* реализует частотный закон управления $u/f = const$;

– *блок модулятора* за цикл ШИМ формирует выходные сигналы управления ячейками таким образом, чтобы выходное эквивалентное напряжение многоуровневого инвертора равнялось заданному напряжению;

– *блок многоуровневого инвертора* представляет собой модель каскадной топологии, состоящей из 8 (для 17- уровневого) последовательно соединённых ячеек (однофазных инверторов) в каждой фазе преобразователя [2];

– *блок нагрузки* представлен моделью высоковольтного асинхронного двигателя АОД-1000-6ДУ1 номинальной мощностью 1000кВт и напряжением 10кВ, составленной по уравнениям Парка без учета насыщения цепи намагничивания и потерь в стали.

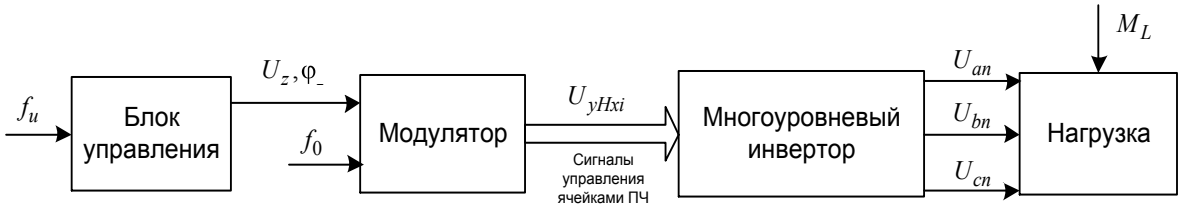

Рис.1. Схема структурная модели электропривода с высоковольтным преобразователем

Блок модулятора включает в себя алгоритмы ШИМ управления преобразователем и может работать как в режиме алгоритма ШИМ «на пиле», так и в режиме алгоритма векторного управления.

Разработанный и реализованный в модели алгоритм векторного управления ВМПЧ рассчитывает времена включения за цикл ШИМ трёх ближайших векторов диаграммы напряжений. Основываясь на принципе минимума переключений, алгоритм определяет последовательности коммутаций векторов и набор оптимальных комбинаций состояний ключей для каждого вектора. Виртуальная модель ВМПЧ, входящая в состав алгоритма, в реальном масштабе времени распределяет коммутационную нагрузку по ячейкам в фазе преобразователя, определяя номера коммутируемых ячеек и их состояния до и после коммутации.

Алгоритм ШИМ «на пиле» [3] с добавлением 1/6 третьей гармоники является классическим и широко используемым алгоритмом управления преобразователями и принимается в качестве базового алгоритма для процедуры сравнения.

Компьютерная модель преобразователя не рассматривает процессы в трёхфазном многообмоточном трансформаторе и подключённых к его вторичным обмоткам выпрямителях, а использует идеальный источник U_d в звене постоянного напряжения всех ячеек как элемент питания однофазного инвертора. Модель однофазного инвертора составлена с учетом параметров и характеристик реального 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 $\omega = 41.2 рад/с$ и номинальной нагрузкой $M_L = 9600 Нм$; задаётся $f_u = 0.4 f_н = 20 Гц$;

В. *Номинальный режим*: статический режим вращения вала двигателя с частотой $\omega = 04 рад/с$ и номинальной нагрузкой $M_L = 9600 Нм$; задаётся $f_u = f_н = 50 Гц$;

С. *Режим на повышенной частоте*: статический режим вращения вала двигателя с частотой $\omega = 207.9 рад/с$ и нагрузкой $M_L = 0.5 M_н = 4800 Нм$; задаётся частота $f_u = 2 f_н = 00 Гц$.

Сравнение алгоритмов управления ВМПЧ выполняется в одинаковых режимах работы, задавая выходную мощность и анализируя потери в системе «ВМПЧ-двигатель». Величина потерь для каждого алгоритма определяет КПД преобразования энергии. Сравнение энергоэффективности системы для каждого из рассматриваемых алгоритмов ШИМ предлагается выполнять по результатам расчёта следующих энергетических показателей:

1. интегрального критерия оценки дополнительных потерь от ШИМ в обмотке двигателя;
2. суммарных потерь в силовых IGBT модулях ячеек преобразователя;
3. коэффициента искажения синусоидальности напряжения двигателя, подключенного 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 дополнительных потерь, предложенная в [4], представляет собой усреднение на периоде расчёта, кратном периоду основной гармоники, значения квадрата токовой ошибки. Сравнение алгоритмов по критерию дополнительных потерь 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 расчёта. 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 линейно-

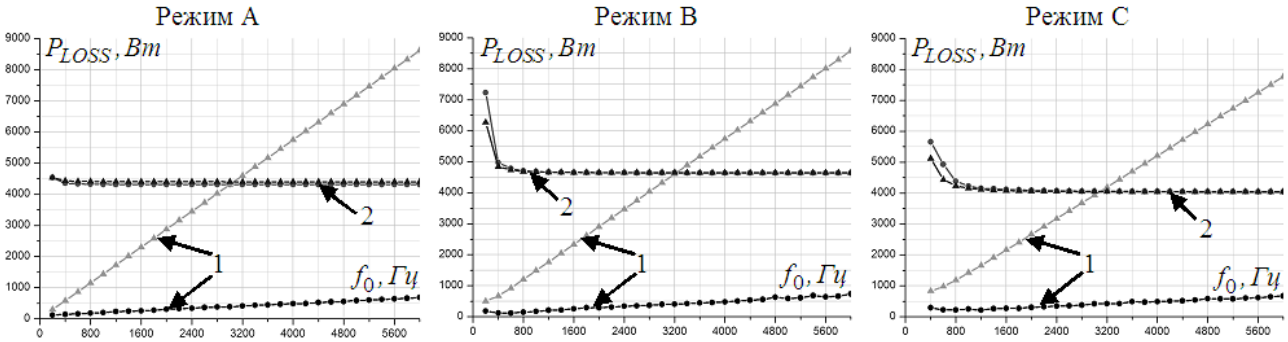

Рис.3. Зависимости потерь мощности в преобразователе от частоты модуляции в режимах A,B,C: 1 – коммутационные потери; 2 – потери на проводимость

го напряжения, вычисляемый по 40 первым кратным гармоникам [5]. Нормально и предельно допустимые значения коэффициента для диапазона номинальных напряжений 6-20кВ составляют соответственно 5% и 8%.

Предложенная авторами методика оценки энергоэффективности систем «ВМПЧ-двигатель» для сопоставления алгоритмов ШИМ сводится к задаче поиска оптимальной частоты модуляции и решается в совокупности факторов минимизации мощности потерь с учетом уровня нормально допустимого коэффициента искажения синусоидальности выходного фазного напряжения. Сравнение алгоритмов выполнено по критерию минимума потерь в одинаковых заданных режимах работы.

Модель электропривода с высоковольтным 17-уровневым каскадным преобразователем и подключенным к его выводам асинхронным двигателем АОД-1000-6ДУ1 составлена в среде программирования Delphi7. Компьютерное моделирование проводилось согласно разработанной программе модельного эксперимента в режимах A,B,C в диапазоне частот основной гармоники выходного напряжения 10…100Гц.

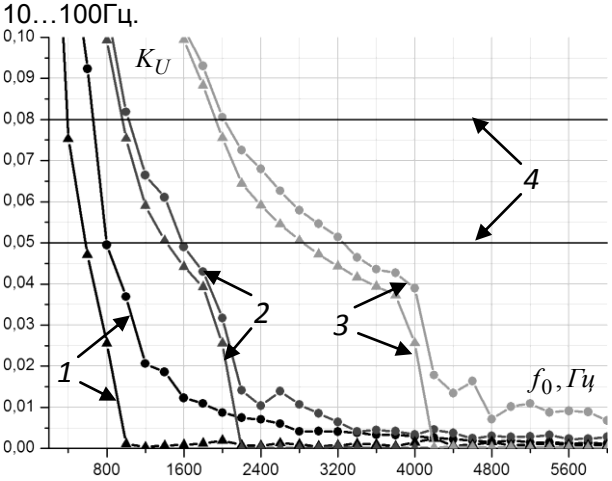

Рис.2. Зависимости коэффициента искажения синусоидальности от частоты модуляции: 1 – в режиме A; 2 – в режиме B; 3 – в режиме C; 4 – нормально и предельно допустимые уровни

В каждом режиме определён рабочий диапазон частот модуляции по значению коэффициента искажения синусоидальности, не превышающего 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 ВМПЧ с векторным ШИМ управлением; символом «▲» - графики, соответствующие алгоритму ШИМ «на пиле».

Заметим, что влияние близких к основной частоте кратных гармоник выходного напряжения в меньшей степени проявляется с алгоритмом ШИМ «на пиле», а соответствующий коэффициент искажения синусоидальности, начиная с определённой частоты модуляции (режим A – 1кГц, режим B – 2,2кГц, режим C – 4,2кГц), принимает практически постоянное минимальное значение.

На рис.3 показаны зависимости потерь в преобразователе от частоты модуляции для сравниваемых алгоритмов в режимах A,B,C. Заметим, что потери проводимости не зависят от частоты модуляции в рабочем диапазоне $f_0 \geq f_{0_\min}$ и увеличиваются только при снижении частоты ниже минимальной. Коммутационные потери в преобразователе пропорциональны частоте коммутации.

Рис.4. Зависимости суммарных потерь мощности в преобразователе от частоты модуляции: 1 – в режиме A; 2 – в режиме B; 3 – в режиме C

Зависимости суммарных потерь в преобразователе от частоты модуляции для сравниваемых алгоритмов ШИМ показаны на рис.4. В рабочем диапазоне частот модуляции состав-

ляющая дополнительных потерь от ШИМ в обмотке статора составляет сотые доли процента от общих потерь двигателя. Таким образом, в системе «ВМПЧ-двигатель» суммарные потери в двигателе зависят от режима работы, а не от алгоритма ШИМ управления.

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

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…100Гц оптимум потерь в преобразователе с векторным управлением может превысить уровень соответствующих минимальных потерь не более чем на 2,5%, тогда как с алгоритмом ШИМ «на пиле» увеличение потерь может составить порядка 30%. Таким образом, минимум потерь для векторного алгоритма допустимо считать в точке оптимума.

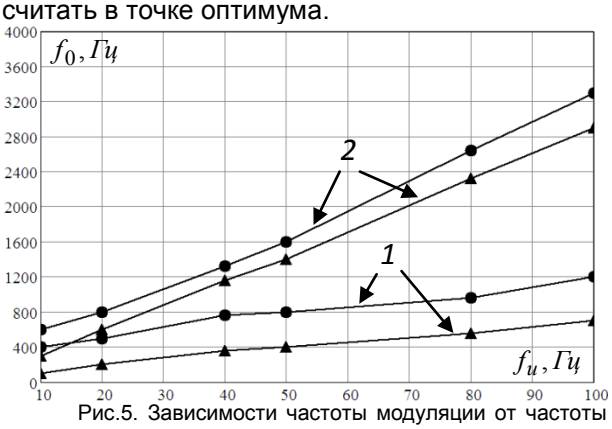

Рис.5. Зависимости частоты модуляции от частоты основной гармоники напряжения: 1 – значения частоты $f_{0_P\min}$; 2 – значения частоты f_{0_opt}

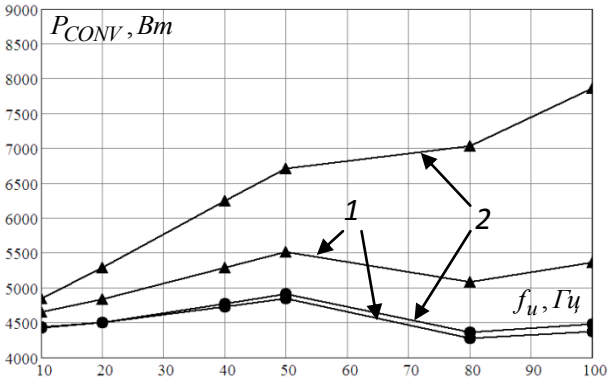

Рис.6. Зависимости значений общих потерь в преобразователе от частоты основной гармоники напряжения: 1 – на частоте $f_{0_P\min}$; 2 – на частоте f_{0_opt}

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

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

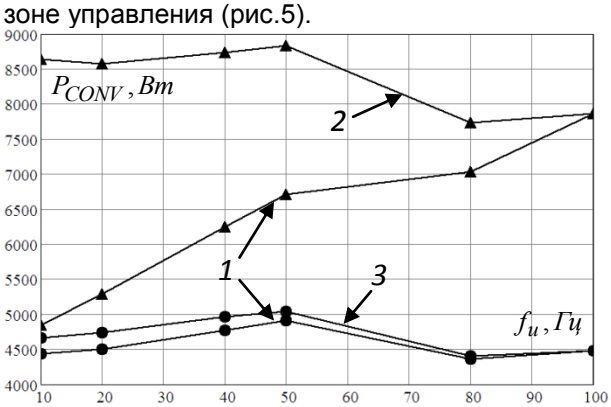

Рис.7. Зависимости значений общих потерь в преобразователе от частоты основной гармоники напряжения: 1 – на частоте f_{0_opt}; 2 – на частоте 2,9кГц; 3 – на частоте 3,3кГц

Сравнительный анализ результатов моделирования предложенного и традиционного алгоритмов 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 и оптимизацией программной части алгоритма.

2. В диапазоне рабочих частот модуляции потери в высоковольтном двигателе при управлении от ВМПЧ практически не зависят от выбора алгоритма или частоты модуляции. Поэтому, дополнительные потери от ШИМ не являются определяющими в силу их малости относительно других составляющих (потерь мощности в преобразователе).

3. Анализ потерь в преобразователе, выполненный для сравниваемых алгоритмов ШИМ регулирования, показал значительное снижение коммутационной составляющей потерь 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 преоб-

разователе). 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 алгоритма ШИМ «на пиле».

6. Слабая зависимость потерь в преобразователе от частоты модуляции для векторного алгоритма, в отличие от алгоритма ШИМ «на пиле», даёт снижение потерь на 43-46% при управлении на постоянной частоте модуляции во всём диапазоне. Векторное управление в функции частоты модуляции по линейным зависимостям оптимальных частот даёт снижение потерь от 8 до 43% в сравнении с ШИМ «на пиле».

Разработанный алгоритм прошёл экспериментальную апробацию на макетном образце высоковольтного каскадного преобразователя, созданного НТЦ Электропривода «Вектор» по заказу ООО «ЧЭАЗ-ЭЛПРИ» Чебоксарского электроаппаратного завода, и показал хорошую сходимость с результатами расчётов и моделирования.

Список литературы

1. Dr. Keith Corzine, Operation and Design of Multi-level Inverters, University of Missouri – Rolla, Dec. 2003.
2. Seyed Saeed Fazel, Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications, Technische Universität, Berlin, July 2007.
3. Колпаков, А. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями / А. Колпаков, Е. Карташев // Силовая электроника. –2009. – №2. – С. 57-65.
4. Виноградов, А.Б. Анализ энергетических показателей и методика выбора оптимальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции для управления трёхфазным инвертором напряжения / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов // Электричество. –2009. – №5. – С. 37-41.
5. 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).

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

Сибирцев Андрей Николаевич,
главный конструктор НТЦ Электропривода «Вектор»,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru

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

Монов Дмитрий Александрович,
ведущий инженер-конструктор НТЦ Электропривода «Вектор»,
телефон (4932) 26-97-08,
e-mail: vector@drive.ispu.ru