

Снижение потерь в инверторах за счет использования различных реализаций нулевых векторов напряжения

Reducing losses in voltage-source inverter by using different implementations of the zero voltage vectors

В данной статье предлагается метод уменьшения динамических потерь в инверторе напряжения, основанный на возможности реализовать одно и то же выходное напряжение двумя разными способами с привязкой нулевого вектора к верхней или нижней шине. Выбирая нулевой вектор в зависимости от мгновенных значений токов фаз, можно добиться снижения динамических потерь в инверторе на 15-20%. Приведены результаты моделирования и натурных испытаний.

Ключевые слова: векторная ШИМ, нулевой вектор, динамические потери, инвертор напряжения.

In this paper we propose a method to reduce dynamic losses in the voltage-source inverter based on the possibility to realize the same voltage vector in two different ways using clockwise or control-clockwise vector change pattern. Choosing the right pattern according to phase currents it is possible to reduce switching losses of 15-20%. The results of modeling and physical experiment are given.

Key words: space-vector PWM, zero-vector, switching losses, voltage-source inverter.

Введение

Для шестиключевых инверторов напряжения (рис.1), широко используемых в преобразовательной технике, разработано множество различных алгоритмов ШИМ для формирования синусоидального трехфазного напряжения [1, 2].

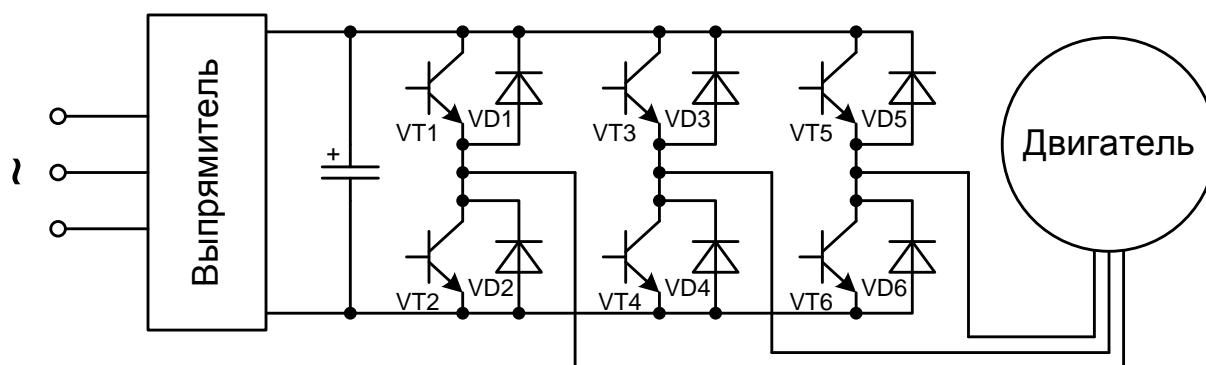


Рис.1. Выпрямитель, шестиключевой инвертор напряжения, трехфазный двигатель

На заре преобразовательной техники использовался метод «синусоидальной ШИМ», где производилось шесть коммутаций стоек на периоде, а выходное напряжение инвертора было меньше, чем на входе его выпрямителя. Затем для повышения напряжения использовался метод подмешивания третьей гармоники в задания скважностей, что увеличивало итоговое выходное напряжение, но не уменьшало количество коммутаций [3]. Затем был разработан метод векторной ШИМ (Space Vector PWM), который в русскоязычной литературе подробно описан в [4], а также реализован в некоторых сигнальных микроконтроллерах Texas Instruments на аппаратном уровне. Данный тип ШИМ позволяет достичь максимально-возможного выходного напряжения на инверторе, а также имеет всего четыре коммутации стоек на периоде, что уменьшает потери в инверторе по сравнению с синусоидальным методом ШИМ.

На рис. 2 изображен классический рисунок, показывающий базовые вектора шестиключевого инвертора и соответствующие им коды состояния. Так, для реализации некоторого заданного напряжения $U_{зад}$, лежащего в нулевом секторе, согласно векторной ШИМ можно использовать как базовые вектора с кодами 100, 110, 111, так и 000, 100, 110. Отличие заключается в использовании различных нулевых векторов: 000 — все нижние ключи замкнуты, т.н. «привязка к нижней шине», или 111 — все верхние ключи замкнуты, т.н. «привязка к верхней шине».

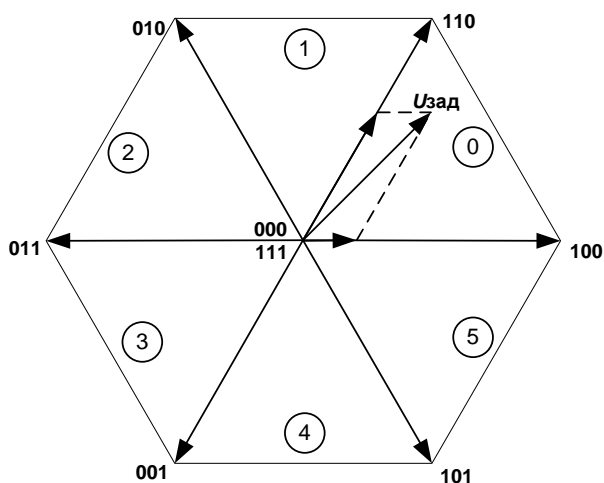


Рис.2. Базовые вектора шестиключевого инвертора и соответствующие им коды состояния

Обычно для работы выбирается какой-то один нулевой вектор, смена между векторами 000 и 111 не производится. С точки зрения получения правильного выходного напряжения нет никакой разницы, какой из нулевых векторов задействован для ШИМ. Только при специализированном «бутстрепном» питании драйверов верхних силовых ключей инвертора обязателен для использования нулевой вектор с кодом 000. В некоторых случаях с целью уменьшения влияния искажений напряжения, вызванных эффектом мертвого времени инвертора, производится смена используемого нулевого вектора непосредственно при работе. Такая смена производится

посередине сектора, за счет чего визуально образуется двенадцать секторов, отсюда получено и название – двенадцатисекторная ШИМ [4]. Два соседних сектора, ранее бывших одним, в таком методе ШИМ используют разные нулевые вектора с кодами 000 и 111. В данной статье предлагается также использовать смену используемых нулевых векторов при работе, но смену производить в функции токов фаз с целью уменьшения динамических потерь инвертора.

Описание способа уменьшения потерь

Рассмотрим коммутации ключей инвертора при реализации вектора напряжения $U_{зад}$, изображенного на рис.2. Для двух разных нулевых векторов можно представить две разных последовательности коммутации, показанных на рис.3, при этом результирующее напряжение $U_{зад}$ будет верно реализовано в обоих вариантах.

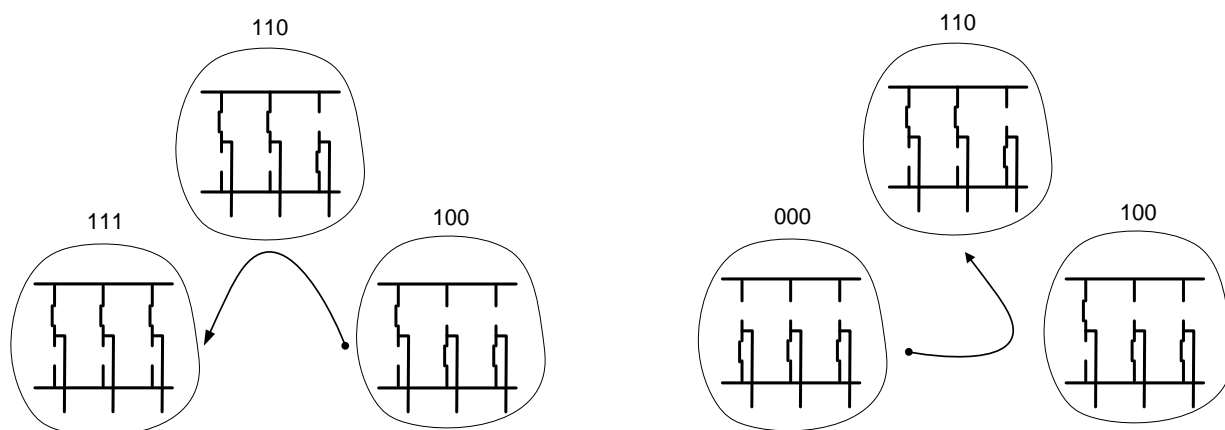


Рис.3. Две различные схемы перебора базовых векторов инвертора при использовании различных нулевых векторов (111 и 000)

Из рисунка видно, что в случае использования нулевого вектора с кодом 111 некоммутируемой на всем периоде ШИМ является стойка фазы А (левая), а при векторе 000 некоммутируемой оказывается стойка С (правая). Идея снижения динамических потерь заключается в том, чтобы на каждом новом периоде ШИМ выбирать такой нулевой вектор, чтобы из двух стоек, которые могут быть некоммутируемыми, в итоге не коммутировалась та, у которой мгновенное значение тока больше. Тогда ток, который придется в итоге коммутировать, окажется меньше. Следовательно, уменьшатся и потери в ключах. Таким образом, алгоритм можно свести к следующему:

- 1) Для текущего заданного напряжения $U_{зад}$ выяснить, какие две стойки могут быть некоммутируемыми. Это зависит только от того, в каком секторе находится $U_{зад}$.
- 2) Для каждой из стоек получить мгновенные токи, протекающие через них в данный момент. Это легко осуществляется датчиками токов фаз.

- 3) Реализовать на следующем периоде ШИМ ту последовательность перебора базовых векторов, при которой не будет коммутироваться стойка, ток в которой оказался больше.

Приведенный алгоритм при реализации на микроконтроллере должен обсчитываться каждый период ШИМ. Таким образом, всегда будет выбрана наиболее выгодная для текущих токов фаз последовательность коммутации ключей.

Разработанный алгоритм был сначала промоделирован в simulink MATLAB. С помощью IGBT ключей из библиотеки компонентов SimPowerSystems была собрана схема инвертора, изображенного на рис.1. В качестве нагрузки использовался управляемый трехфазный источник тока, позволяющий задавать трехфазный ток с любой реактивной составляющей. Для управления ключами был написан модуль ШИМ на языке Си, подключенный в качестве функционального блока также в модель simulink. Данный модуль реализовывал векторную ШИМ с приведенным выше алгоритмом уменьшения потерь инвертора, а также позволял отключать этот алгоритм в целях сравнения. На вход модуля ШИМ поступало задание вектора напряжения, а также мгновенные токи фаз, необходимые для работы алгоритма уменьшения потерь. Управление заданием модуля ШИМ и источником тока нагрузки осуществлял еще один блок, формирующий синусоидальные задания тока и напряжения, типичные для работы двигателя. Также на языке Си был написан блок, качественно оценивающий динамические потери ключей. Для работы этого блока было принято допущение, что энергия потерь при каждой коммутации зависит только от протекающего по ключу тока и пропорциональна ему. Модуль учета потерь фиксировал каждую коммутацию ключа, и для некоторого интервала времени (периода ШИМ) суммировал все коммутированные токи, получая величину, пропорциональную энергии потерь. Путем вычисления отношения этой энергии к интервалу времени получалась величина, пропорциональная мощности потерь за период ШИМ.

На рис.4 продемонстрированы результаты работы модели при использовании классической шестисекторной векторной ШИМ. На верхней осциллограмме показаны ток и напряжение фазы А. Ток задан с некоторой реактивной составляющей. На нижней осциллограмме показан выход модуля оценки потерь, пропущенный через инерционный фильтр, а также флаг использования нулевого вектора – бинарная переменная, показывающая, какой из нулевых векторов (000 или 111) используется. Флаг не меняется, что подтверждает то, что нулевой вектор используется один и тот же. Также был проведен эксперимент с использованием другого нулевого вектора, но результат был полностью аналогичен приведенному — несмотря на другой нулевой вектор, потери и остались неизменными (сдвинулась только фаза колебаний мощности потерь, что, в конечном счете, на суммарный нагрев не влияет).

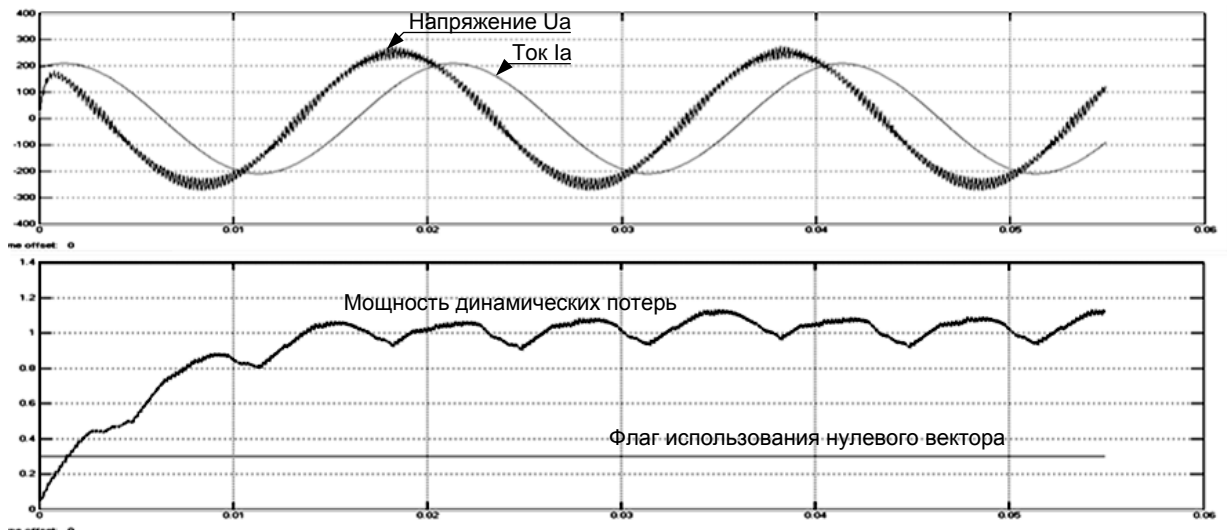


Рис.4. Классическая векторная ШИМ. Ток и напряжение фазы А (верхняя осциллограмма), мощность динамических потерь и флаг использования нулевого вектора (нижняя осциллограмма).

На рис.5 показаны аналогичные осциллограммы, но при работе алгоритма снижения потерь.

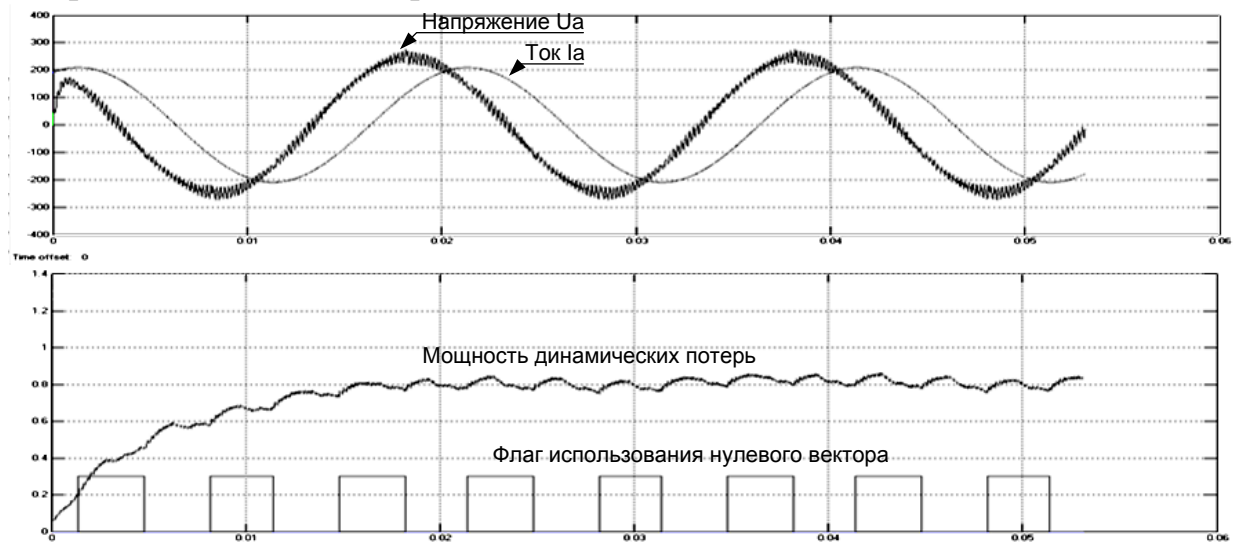


Рис.5. Векторная ШИМ с алгоритмом снижения потерь. Ток и напряжение фазы А (верхняя осциллограмма), мощность динамических потерь и флаг использования нулевого вектора (нижняя осциллограмма).

Верхняя осциллограмма совпадает с осциллограммой классической векторной ШИМ. Это подтверждает, что алгоритм уменьшения потерь и смена нулевого вектора на ходу не повлияли на качество воспроизведения заданного напряжения. Однако на нижней осциллограмме видно, что мощность потерь уменьшена по сравнению с классической векторной ШИМ. Кроме того, видна смена нулевого вектора — шесть раз за период основной гармоники тока, что говорит о работе алгоритма уменьшения потерь. При использовании классической векторной ШИМ мощность потерь на осциллограмме составила в среднем 1,0 условных единиц, а при работе

алгоритма снижения потерь — только 0,8. Данный результат позволяет полагать, что введение такого алгоритма позволяет на 20% снизить мощность динамических потерь инвертора.

На модели было проведено несколько экспериментов при различной реактивной составляющей тока и различной амплитуде напряжения. В данной статье эти осциллограммы не приводятся из-за громоздкости, однако в табл.1 приведена сводка экспериментов зависимости потерь от углового рассогласования между током и напряжением. Видно, что во всех случаях включение алгоритма снижения потерь уменьшало потери на 15-20%. Дополнительно было выявлено, что полностью реактивный ток при векторной ШИМ увеличивает динамические потери по сравнению с полностью активным током. От амплитуды выходного напряжения при том же токе потери практически не изменялись, поэтому сводка результатов не приводится.

Табл.1. Результаты моделирования

Угол между током и напряж., градусы	Мощность потерь, относительные единицы	
	Классический ШИМ	ШИМ с алгоритмом снижения потерь
0	0.82	0.65
30	0.9	0.71
60	0.95	0.75
90	1	0.8

Практическая проверка результатов

Для подтверждения результатов на практике был использован стенд, состоящий из преобразователя частоты мощностью 7,5 кВт и асинхронного двигателя. Преобразователь управлялся контроллером на основе DSP микроконтроллера TMS320F2810. Программа модуля ШИМ и алгоритма снижения потерь на языке Си была перенесена из модели MATLAB в ПО управления преобразователем. После чего было произведено два тепловых эксперимента: при использовании классической шестисекторной векторной ШИМ и при работе ШИМ, дополненной алгоритмом уменьшения потерь. Преобразователь работал в замкнутой по току структуре управления для исключения факторов влияния искажений мертвого времени, нагрева обмоток двигателя и т.п. Системой управления поддерживался ток амплитудой 15 А, частота ШИМ была установлена равной 10 кГц. Преобразователь включался при комнатной температуре и отключенном принудительном охлаждении (вентиляторы радиатора), после чего на компьютере автоматически строился график нагрева его радиатора (точки, на 3 см отстоящей от IGBT модуля). Не смотря на то, что два эксперимента были проведены в разное время, в целях сравнения и анализа графики нагрева были наложены один на другой (рис.6).

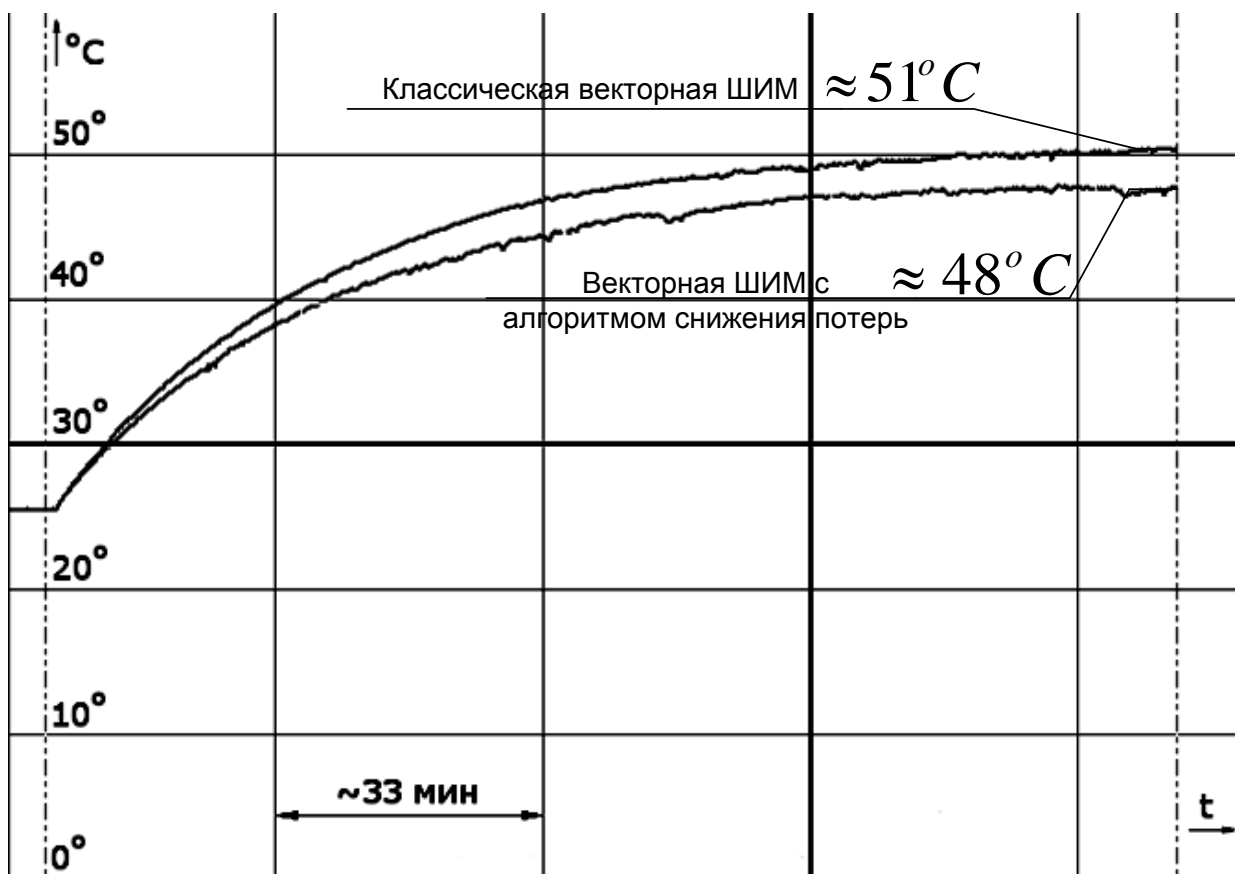


Рис.6. Графики эксперимента по нагреву преобразователя: при использовании алгоритма снижения потерь и без него.

Эксперименты продолжались приблизительно 2 часа 20 минут, до выхода значения температуры к установившемуся значению. Видно, что график нагрева с использованием алгоритма снижения потерь проходит ниже, чем график нагрева без него, а установившаяся температура — меньше. Так, разница в установившихся температурах составляет 3°С.

Перегрев — разница между средней установившейся температурой и температурой окружающей среды — в среднем для двух графиков составляет 25°С. В первом приближении можно сказать, что перегрев пропорционален потерям в инверторе, тогда при применении алгоритма уменьшения потерь потери снизились на 10%.

Для используемого в преобразователе IGBT модуля на частоте 10 кГц динамические потери составляют примерно 3/5 от общих потерь (динамические плюс статические). Таким образом, если считать, что статические потери не изменились, то уменьшение динамических потерь составляет примерно 17%.

Этот результат близок к ожидаемому результату, полученному при моделировании в MATLAB.

Выводы

Небольшой модификацией стандартной векторной ШИМ, а именно введением зависимости между используемым нулевым вектором напряжения (код 000 или 111) и мгновенными токами фаз, можно добиться снижения

динамических потерь в АИН на 15-20%. Работоспособность алгоритма снижения потерь проверена и моделированием, и практическим экспериментом. Из минусов можно отметить то, что для реализации смены нулевого вектора «на ходу» потребуется поддерживающий это микроконтроллер, имеющий достаточную производительность и «теневые» регистры для смены уставок сравнения и настроек ШИМ-генератора. Кроме того, если в ПО контроллера используются какие-либо алгоритмы компенсации эффекта мёртвого времени, то необходимо в их работе учитывать возможность произвольной смены используемого нулевого вектора.

Применение метода позволяет снизить температуру радиатора преобразователя частоты на 2-3 °С, что увеличит срок службы элементов, испытывающих нагрев от силовой части, например, электролитических конденсаторов, в 1,2-1,3 раза. Если задаться тем же сроком службы преобразователя, то можно уменьшить размер радиатора системы охлаждения на 10%.

Список литературы

1. **Козаченко В.Ф.**, Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам, СНИР-NEWS, 1999
2. **Анучин А.С.**, Широтно-импульсная модуляция методом реализации мгновенных фазных потенциалов для трехфазных инверторов напряжения, Труды V Международной (16 Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, Санкт-Петербург, 2007, с.263-265
3. **Анучин А.С.**, Частотное управление асинхронного электропривода, Энциклопедия «Машиностроение», том IV-2, «Электропривод. Гидро- и виброприводы», книга 1 «Электропривод», Москва, Машиностроение, 2012, с.256-279
4. **Чуев П.В.**, Разработка систем векторного управления асинхронными приводами на базе специализированных сигнальных микроконтроллеров: Дисс. канд. тех. наук: 05.09.03 / Моск. энерг. ин.-т. –М., 2002. – 254 с.

Автор: Лашкевич Максим Михайлович окончил в 2009 г. кафедру АЭП НИУ «МЭИ». Аспирант кафедры. С 2007 г. сотрудник ООО "НПФ Вектор" (инженер-программист).

Тел.: +7-495-362-7151

e-mail: maxsoftpage@yandex.ru