

УДК 621.314.333

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

К.Е. Михеев, В.С. Томасов

Проведен анализ энергетических показателей энергоподсистем электроприводов переменного тока, построенных на базе многоуровневых преобразователей напряжения различной топологии. В пакете Matlab/Simulink с использованием библиотек Simulink и SimPowerSystems разработан специализированный блок вычислений «Measurements», позволяющий проводить анализ и сравнение энергетических показателей многоуровневых преобразователей.

Ключевые слова: энергоподсистема, энергетические показатели, многоуровневые преобразователи, электропривод, синусоидальная широтно-импульсная модуляция, ШИМ, моделирование.

Введение

Диапазон регулирования угловой скорости в современных системах прецизионного электропривода может определяться значениями от нескольких угловых секунд в секунду до десятков градусов в секунду. Такой диапазон скорости требует соответствующего диапазона изменения входного напряжения, что зачастую не удается реализовать при построении энергоподсистем на основе традиционных мостовых схем с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). По этой причине в настоящее время практикуется применение многоуровневых преобразователей напряжения, позволяющих значительно расширить диапазон регулирования напряжения. Одним из важнейших преимуществ многоуровневых преобразователей, помимо большого диапазона напряжения, является их способность генерировать на выходе напряжение, более качественное по энергетическим показателям и, в частности, по гармоническому составу, чем у одноуровневых преобразователей. Методы определения, формулы расчета энергетических показателей качества электроэнергии хорошо известны и широко применяются при расчетах цепей синусоидального тока [1–3]. Оценка качества электроэнергии существенно усложняется при анализе многоуровневых преобразователей, так как на выходе последних имеется квази-синусоида сложной формы, разложение которой в ряд Фурье без помощи ЭВМ практически невозможно. Вычислительные мощности современных пакетов программ позволяют без особого труда смоделировать работу любых преобразователей и провести анализ их работы. Целью работы является анализ энергетических показателей энергоподсистем прецизионных электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости, построенных на базе многоуровневых преобразователей напряжения, с применением пакета Matlab/Simulink.

Обзор основных схем многоуровневых преобразователей

В настоящее время в основном распространены две основные топологии построения многоуровневых инверторов [3, 4].

Мостовая схема. Строится по принципу традиционной трехфазной мостовой схемы инвертора, но с той лишь разницей, что на каждое плечо моста приходится не два полностью управляемых ключевых элемента, а 4, 6 и т.д., с включенными параллельно им обратными диодами. Кроме того, для построения многоуровневых инверторов используются дополнительные элементы, такие как блокирующие диоды или конденсаторы с нефиксированным уровнем напряжения на них (возможны две разновидности топологии), необходимые для баланса нейтральной точки и корректной работы схемы. Общий вид одного плеча такой схемы для двух разновидностей топологии представлен на рис. 1. Принципиальные схемы, изображенные на рис. 1, а также обозначения элементов заимствованы из [5].

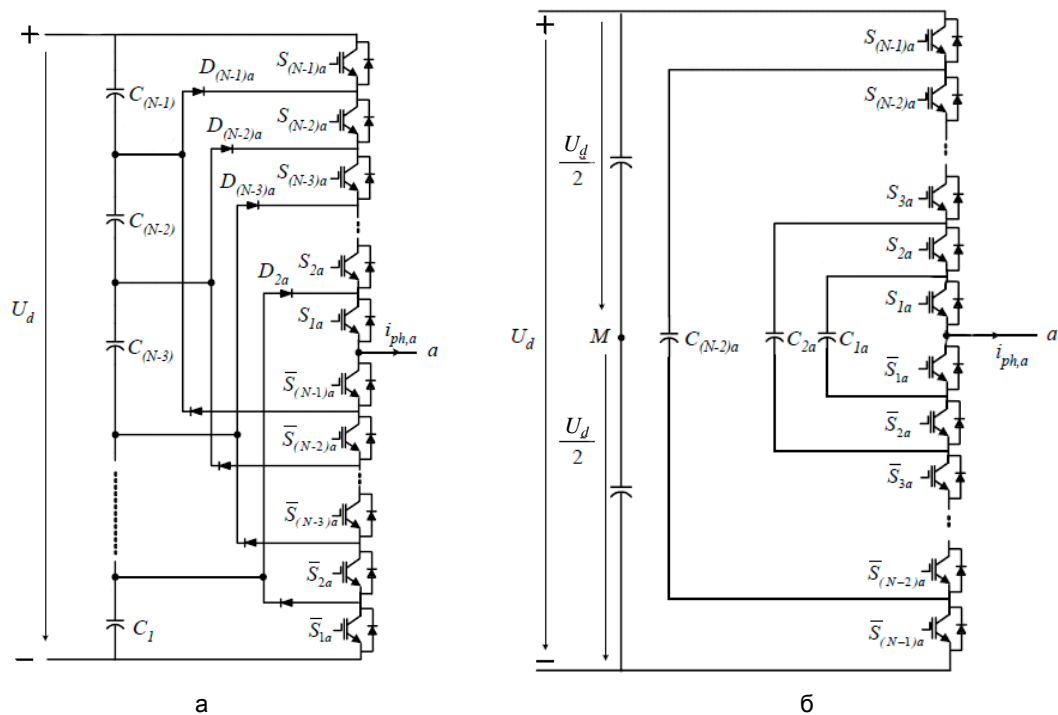


Рис. 1. Мостовые топологии: с блокирующими диодами (а); с плавающими конденсаторами (б)

Схема инвертора на базе однофазных Н-мостовых схем. Простейший вариант такой схемы строится на базе трех однофазных мостов, положительный вывод каждого из которых подключается к соответствующей фазе нагрузки, а отрицательные выводы всех трех соединены в общую точку. Большое число уровней в кривой выходного напряжения достигается последовательным включением нескольких Н-мостовых схем для каждой фазы. Общий вид данной топологии представлен на рис. 2. Обозначения и сама схема также заимствованы из источника [5]. Данная топология имеет, в силу ряда причин, большее распространение. К ним относятся простота схемы по сравнению с мостовой, отсутствие делительных или плавающих конденсаторов, что исключает сложные процессы зарядки-разрядки, более простое управление, возможность работы даже при выходе из строя одного или нескольких Н-мостов. Недостатком Н-мостовых схем является необходимость создания множества источников постоянного напряжения, что обычно достигается путем применения сложного многообмоточного трансформатора с последующим выпрямлением напряжения.

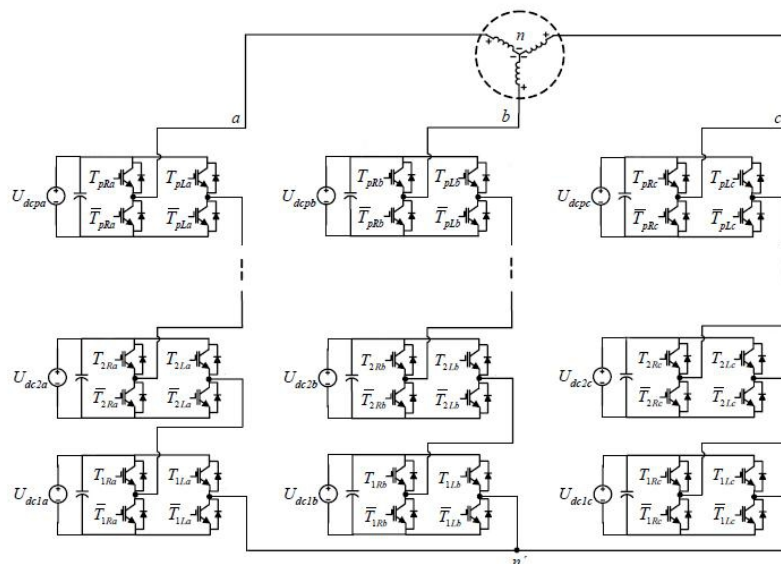


Рис. 2. Н-мостовая топология

Параметры моделирования

В работе приняты следующие параметры управления и нагрузки: амплитуда первой гармоники фазного напряжения на нагрузке $U_{\phi,1\max}=100$ В; индекс модуляции $m=1$; частота коммутации ключей инвертора $f_k=1$ кГц; трехфазная активно-индуктивная нагрузка $L_{\phi}=10$ мГн; $R_{\phi}=1$ Ом; способ модуляции

кривой напряжения – синусоидальная ШИМ. Моделирование реального источника постоянного напряжения (ИПН) не проводилось, так как это усложнило бы модель, и не является обязательным для анализа работы непосредственно самого инвертора. Реальный ИПН при моделировании заменен идеализированным источником – блоком DC Voltage Source (библиотека SimPowerSystems/Electrical Sources). Значение постоянного напряжения выбирается исходя из топологии схемы [3, 4]:

- для мостовых схем при применении синусоидальной ШИМ оно равно удвоенной амплитуде первой гармоники;
- для схем на базе H-мостовых ячеек напряжение на входе каждой ячейки равно амплитуде первой гармоники выходного напряжения, деленной на число последовательно включенных H-мостов.

Параметры ключевых элементов были выбраны одинаковыми для всех схем.

Для определения энергетических показателей качества собрана подсистема «Measurements» на основе стандартных блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems (рис. 3).

Определение энергетических показателей

Известно [1–3], что полная, или кажущаяся, мощность S определяется произведением действующих значений напряжения и тока на входе системы. Она всегда превышает фактически передаваемую в нагрузку активную мощность P из-за появления неактивных составляющих полной мощности обменного характера – мощности сдвига Q (реактивной), мощности искажения T , мощности несимметрии H – и определяется выражением

$$S = UI, \quad (1)$$

где U, I – действующие значения напряжения и тока. В свою очередь, ее можно выразить через составляющие следующим образом:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + H^2}. \quad (2)$$

Мощность несимметрии H в данном случае равняется нулю. Активная мощность P равна среднему значению мгновенной мощности за период питающего напряжения и определяет количество электромагнитной энергии, необратимо преобразующейся в другие формы энергии:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt, \quad (3)$$

где $u(t), i(t)$ – мгновенные значения напряжения и тока; T – период кривой напряжения (тока).

Полная и активная мощности связаны через коэффициент мощности:

$$K_{\text{мощн}} = \frac{P}{S}. \quad (4)$$

Реактивная мощность, или мощность сдвига Q , обусловлена сдвигом по фазе основной гармоники тока относительно напряжения питающей сети и связана с активной мощностью через коэффициент сдвига

$$K_{\text{сдв}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (5)$$

Для линейных систем с синусоидальным напряжением коэффициент мощности и коэффициент сдвига одинаковы и равны косинусу угла сдвига фазы φ между током и напряжением:

$$K_{\text{мощн}} = K_{\text{сдв}} = \cos \varphi. \quad (6)$$

Для определения активной и реактивной мощности на основе измерений тока и напряжения цепи в пакете Matlab используется блок Active & reactive Power библиотеки SimPowerSystems.

При появлении несинусоидальных составляющих тока необходимо учитывать мощность искажения T

$$T = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}. \quad (7)$$

Коэффициент искажения характеризует обмен энергией между источником и приемником, обусловленный высшими гармоническими составляющими тока:

$$K_{\text{иск}} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{P^2 + Q^2 + T^2}}. \quad (8)$$

Коэффициент гармоник, или интегральный показатель гармонического состава тока (Total Harmonic Distortion), характеризует соотношение между энергией, обусловленной высшими гармониками тока, и энергией обусловленной основной (первой) гармоникой:

$$K_{\text{гарм}} = \frac{T}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{K_{\text{иск}}}\right)^2 - 1}. \quad (9)$$

Коэффициент полезного действия энергоподсистемы определяется как отношение активной мощности, фактически передаваемой в нагрузку P_d , к потребляемой из сети активной мощности P :

$$\eta = \frac{P_d}{P} . \tag{10}$$

На рис. 3 представлена разработанная подсистема «Measurements», позволяющая на основе (1)–(10) определить активную (P), реактивную (Q), кажущуюся (S) фазные мощности; фазную мощность искажения (T), коэффициент искажения (K_{isk}), коэффициент мощности (K_m), коэффициент сдвига (K_{sdv}), коэффициент гармоник (K_{garm}), коэффициент гармоник тока (K_{garm_I}), коэффициент полезного действия инвертора η (KPD), а также среднее значение тока питания (I_{in}) посредством применения стандартных блоков библиотек Simulink и SimPowerSystems. В скобках приведены обозначения параметров, используемые в пакете Matlab при построении подсистемы и ее моделировании.

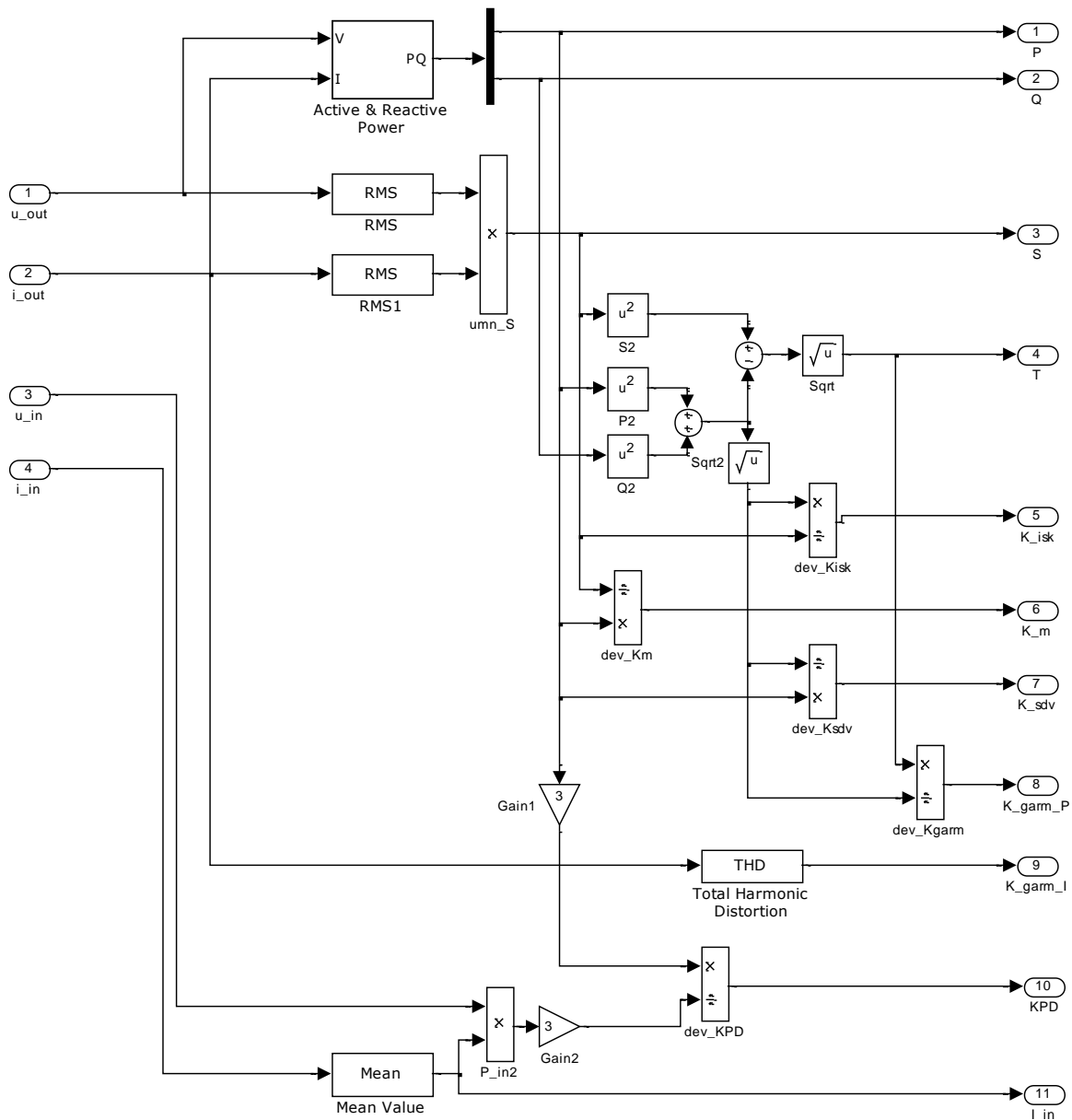
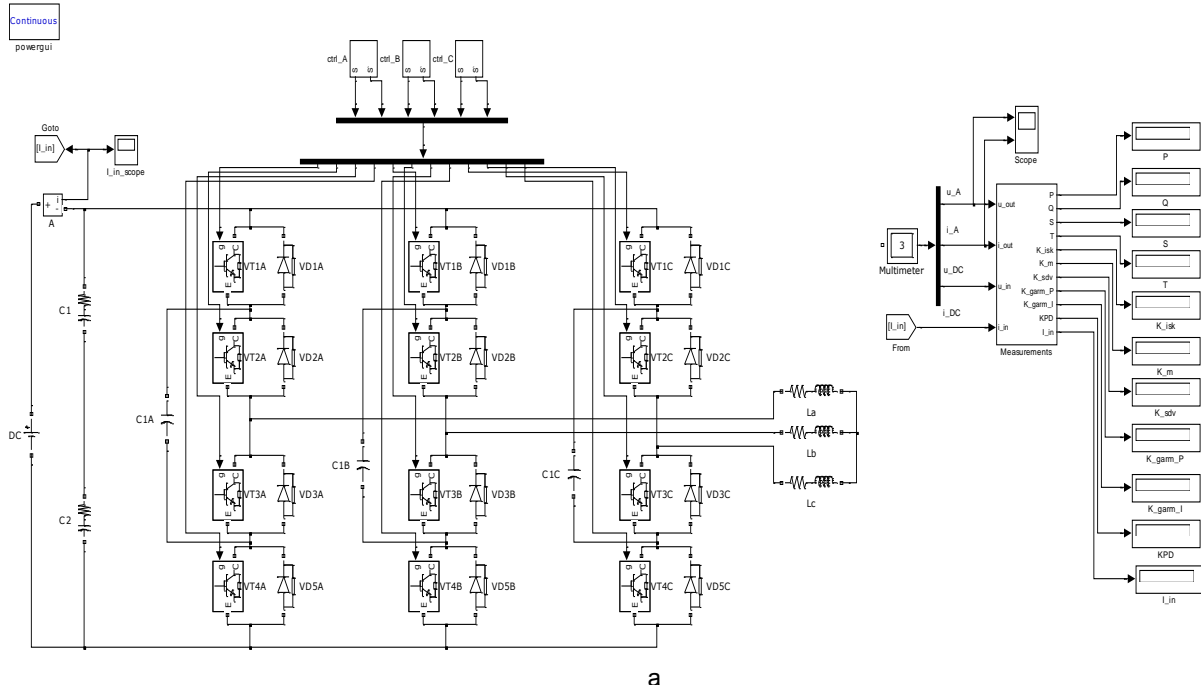


Рис. 3. Подсистема «Measurements»

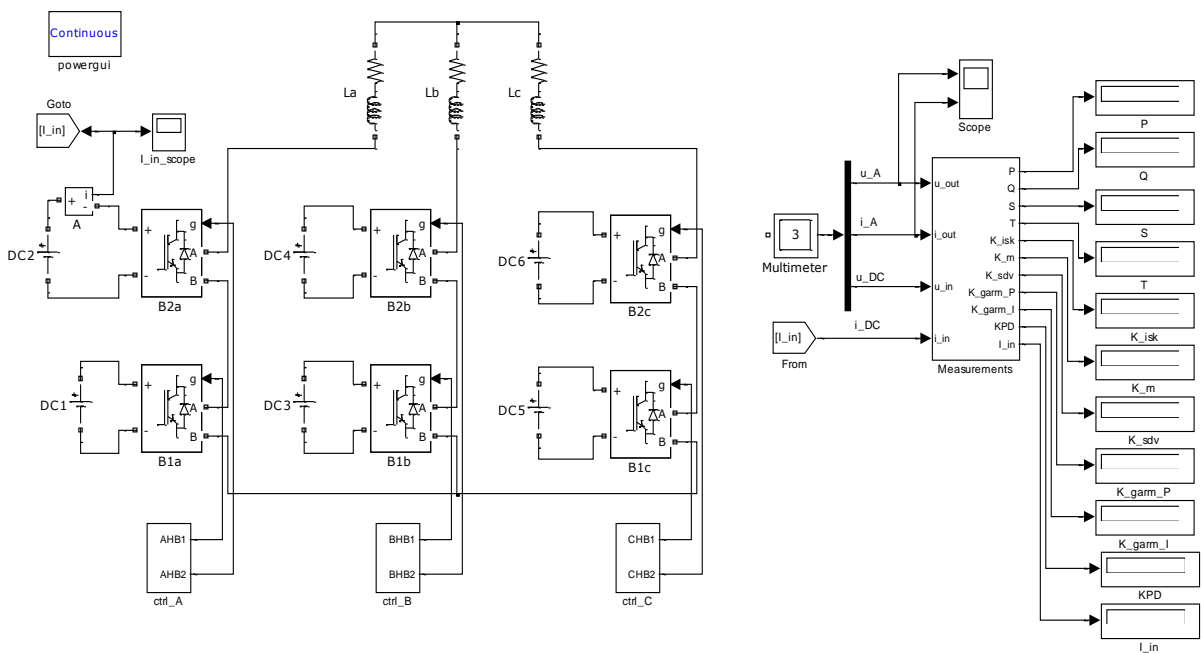
Моделирование

Блоки управления транзисторами для каждой схемы состоят из стандартных блоков и представлены на моделях в виде подсистем. При синусоидальной ШИМ происходит сравнение опорного синусоидального напряжения, величина амплитуды которого определяется индексом модуляции m , с пилообразным напряжением постоянной амплитуды. В момент равенства этих сигналов компаратор выдает импульсы управления ключами соответствующей длительности [3, 4].

На рис. 4 приведены: схема трехуровневого мостового инвертора (мост 3×4) – вариант топологии рис. 1, б, с четырьмя транзисторами в каждом плече моста (рис. 4, а); схема пятиуровневого Н-мостового инвертора (Н-мост $3 \times 2Н$) – вариант топологии рис. 2, с двумя Н-мостовыми ячейками на каждую фазу нагрузки (рис. 4, б). Изображения элементов и обозначения на рисунках соответствуют обозначениям, принятым в пакете Matlab. Для сравнения энергетических показателей авторами смоделированы мостовая двухуровневая схема (2 транзистора в плече – мост 3×2), мостовая четырехуровневая схема (6 транзисторов в плече – мост 3×6) и Н-мостовая двухуровневая схема (одна Н-мостовая ячейка на фазу, Н-мост $3 \times 1Н$).



а



б

Рис. 4. Схемы моделирования: трехуровневый мостовой инвертор (а); пятиуровневый Н-мостовой (б)

Для анализа энергетических показателей схем получены кривые напряжения и тока на выходе инвертора. Для этого применен блок осциллографа Scope (библиотека Simulink/Sinks). Для сравнения проведено моделирование пяти схем многоуровневых инверторов.

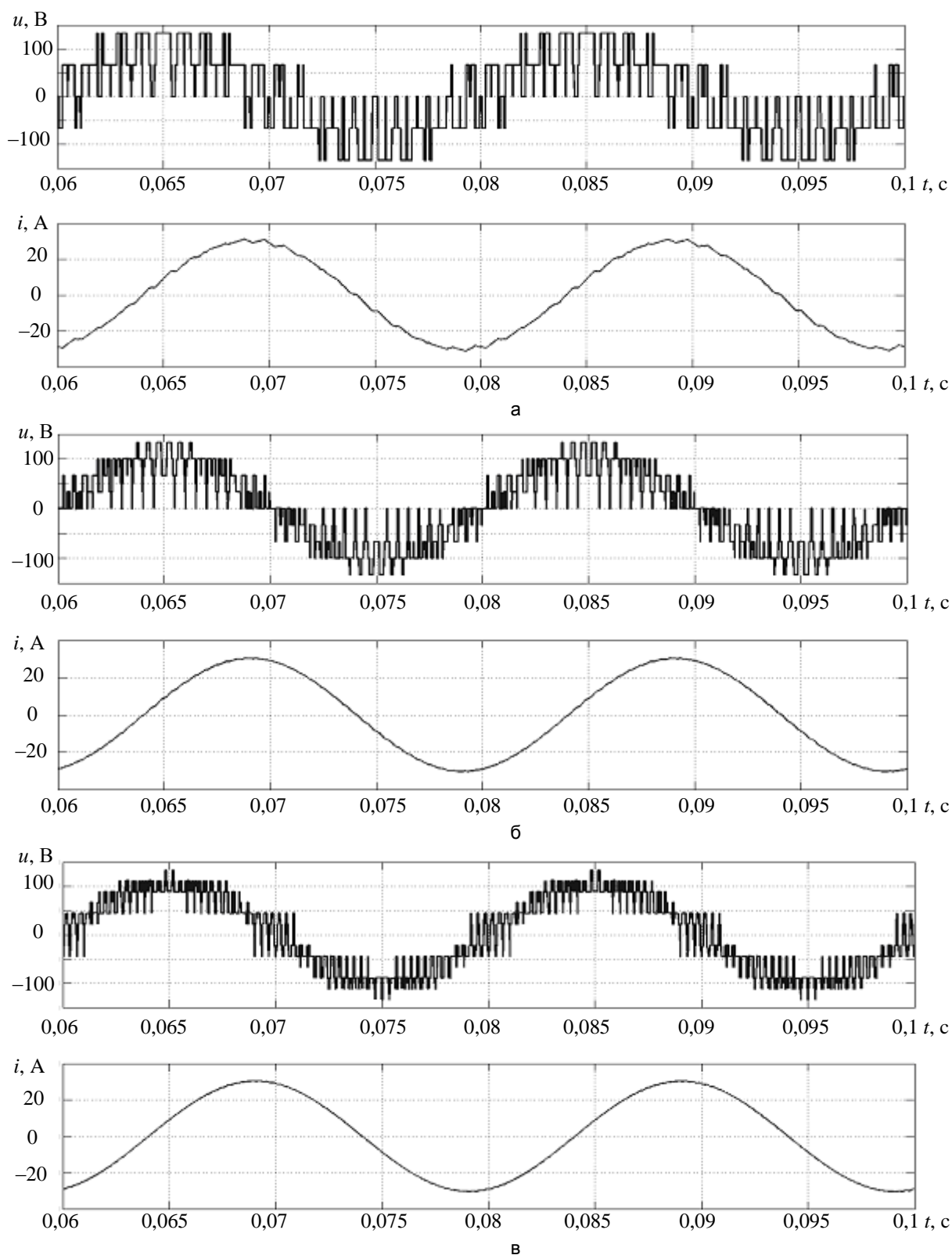


Рис. 5. Диаграммы выходных напряжений (u) и токов (i): мостовая двухуровневая (а); мостовая трехуровневая (б); мостовая четырехуровневая (в)

Сравнение результатов показало, что усложнение схемы приводит к увеличению числа ступеней в кривой фазного напряжения и, как следствие, уменьшению пульсаций в кривой фазного тока, что наблюдается на диаграммах напряжений и токов и выражается в улучшении энергетических показателей, в первую очередь, за счет значительного уменьшения мощности искажения. На рис. 5 приведены диаграммы токов и напряжений для трех мостовых схем. Для моделирования изображения взят временной участок от 0,06 с до 0,1 с, на котором уже закончились переходные процессы, имеющие место в начале ра-

боты схемы. Форма токов и напряжений для H-мостовых схем почти идентична форме токов и напряжений для трех- и четырехуровневых мостовых схем, что подтверждается значениями показателей качества (таблица).

В таблице приведены наиболее значимые показатели качества электроэнергии на выходе преобразователя, полученные в результате моделирования: фазная активная мощность (P_{ϕ}), фазная реактивная мощность (Q_{ϕ}), фазная мощность искажения (T_{ϕ}), полная фазная мощность (S_{ϕ}), коэффициент искажения ($K_{иск}$), коэффициент мощности ($K_{мощн}$), коэффициент гармоник по напряжению ($K_{гарм}$), коэффициент гармоник тока ($K_{гарм\ тока}$). Как было отмечено выше, более сложные схемы инверторов дают лучшее качество электроэнергии, что выражается в уменьшении мощности искажения и соответствующем улучшении показателей качества.

Схема	P_{ϕ} , Вт	Q_{ϕ} , вар	T_{ϕ} , Вт	S_{ϕ} , В·А	$K_{иск}$	$K_{мощн}$	$K_{гарм}$	$K_{гарм\ тока}$
мост 3×2	454	1437	1040	1831	0,82	0,25	0,69	0,026
мост 3×4	460	1442	606	1631	0,93	0,28	0,4	0,008
мост 3×6	459	1442	458	1582	0,96	0,29	0,3	0,005
H-мост 3×1H	456	1436	612	1626	0,93	0,28	0,41	0,008
H-мост 3×2H	456	1435	389	1555	0,97	0,29	0,26	0,003

Таблица. Показатели качества электроэнергии, полученные в результате моделирования

Заключение

Разработаны математические модели многоуровневых полупроводниковых преобразователей, которые позволили осуществить анализ сложных по своей топологии и по математическому описанию схем силовой электроники, находящих применение в прецизионных быстродействующих и широкодиапазонных электроприводах. Анализ напряжений в фазах нагрузки подтвердил, что с увеличением числа уровней преобразуемого напряжения уменьшается амплитуда пульсаций тока нагрузки и улучшается его гармонический состав. Это позволяет увеличить срок работы электрической машины, снять ограничения на длину кабеля подключения двигателя, исключить установку дополнительных входных и выходных фильтров. Определены численные значения показателей качества электроэнергии для энергоподсистем систем электропривода с различной топологией и структурой выходных каскадов полупроводниковых преобразователей. Показано, что применение сложных схем инверторов позволяет получить лучшее качество электроэнергии, что выражается в уменьшении мощности искажения и соответствующем улучшении показателей качества.

Результаты работы нашли практическое применение при проектировании и разработке энергоподсистем прецизионных электроприводов телескопов тракторных измерений и оптико-электронных комплексов регистрации космических объектов и аппаратов, проводимых на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по заказам Роскосмоса РФ.

Литература

1. Маевский О.А. Энергетические показатели вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
2. Борисов П.А., Томасов В.С. Определение составляющих полной мощности энергоподсистем электротехнических комплексов в пакете Matlab // Exponenta Pro. Математика в применениях. – 2004. – № 1. – С. 40–44.
3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 199 с.
4. Пронин М.В., Воронцов А.Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет). – СПб: Электросила, 2003. – 172 с.
5. C. Boit. Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications. – Berlin: Technische Universität, 2007. – 160 p.

Михеев Кирилл Евгеньевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, mikhkirill@yandex.ru
Томасов Валентин Сергеевич – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой, tomasov@ets.ifmo.ru