

Многоуровневые инверторы напряжения

в прецизионном сервоприводе

Современный прецизионный сервопривод комплексов высокоточных оптических измерений строится по структуре безредукторного (прямого) привода на основе высокомоментных вентильных двигателей с возбуждением постоянными магнитами (ВД). Это обеспечивает возможность регулирования координат движения в широком диапазоне, а также высокую надежность привода в предельно жестких условиях эксплуатации. В качестве усилителей мощности в таких электроприводах целесообразно использовать многоуровневые инверторы напряжения, сочетающие свойства широтной и амплитудной модуляции. Они позволяют расширить диапазон регулирования скорости, снизить рабочие напряжения ключей и конденсаторов и существенно улучшить гармонический состав напряжения и тока нагрузки. Показано, что изменение алгоритма модуляции приводит к значительному изменению пульсаций электромагнитного момента двигателя и требует исследования влияния этих факторов при оптимизации характеристик сервопривода.

Валентин Томасов

tomasov@ets.ifmo.ru

Александр Усольцев
Денис Вертегел
Константин Денисов

Комплексы высокоточных оптических измерений, использующие в своих системах управления сервоприводы, разрабатываемые в научно-производственном центре «Прецизионная электромеханика» (НПЦ «ПЭ») СПб НИУ ИТМО, предназначены для преобразования кодов задания траектории движения оптической оси телескопов

в углы поворота осей опорно-поворотного устройства (ОПУ). Коды задания траектории движения поступают либо от центрального вычислительно-управляющего комплекса (ЦВУК), либо от телевизионных автоматов (ТА), либо и от ЦВУК и от ТА. В большинстве случаев это происходит всего по двум координатам — углу места и азимуту [1, 2].

В настоящее время такими комплексами высокоточных наблюдений оснащены соответствующие службы космодромов Байконур, Плесецк, Восточный и различные станции оптических наблюдений на территории России и за рубежом. В 2014 году в Бразилии, на базе университета Де Бразилиа введена в эксплуатацию первая российская квантово-оптическая станция наблюдения «Сажень-ТМ» системы ГЛОНАСС (рис. 1). Осенью 2017 года также в Бразилии, в штате Минас-Жерайс, на территории одной из крупнейших



Рис. 1. Станция наблюдения «Сажень-ТМ» системы ГЛОНАСС на базе университета Де Бразилиа



Рис. 2. Станция наблюдения и регистрации космического мусора в обсерватории Пико дос Диас

обсерваторий Пико дос Диас завершены работы по установке и монтажу автоматизированного широкопольного оптико-электронного комплекса обнаружения космических объектов (ОЭК — ОКМ), специализирующегося на регистрации «космического мусора» (рис. 2).

В настоящее время наземные оптико-электронные средства (по традиции их часто называют оптическими телескопами) играют первостепенную роль в обнаружении и контроле космических объектов, особенно на больших удалениях. Новые поколения широкопольных и узкопольных телескопов, разрабатываемых в нашей стране с прецизионными электроприводами НПЦ «ПЭ» Университета ИТМО, с размерами зеркал от нескольких десятков сантиметров до трех метров, обеспечивают высокое качество изображений с угловым разрешением менее половины угловой секунды. Несомненным и уникальным достоинством оптических телескопов являются возможность обнаружения удаленных объектов при солнечном или лазерном подсвете на фоне ночного или сумеречного неба [1, 2].

В задачах, требующих обнаружения объектов с предельно слабым блеском, для обеспечения длительных экспозиций (от единиц секунд до нескольких минут) точность удержания оптической оси в пространстве не должна превышать половину угловой секунды в течение времени экспозиции. В задачах сопровождения движущихся космических объектов часто требуется, чтобы динамическая погрешность сопровождения не превышала одной угловой секунды при скоростях смещения объекта от нескольких угловых секунд в секунду до $10^\circ/\text{с}$ и более. В задачах наведения предельно узких лазерных пучков (при локации навигационных и геодезических космических аппаратов, а также Луны и дальних космических аппаратов) требуется абсолютная, по отношению к используемой системе координат, точность наведения не хуже нескольких угловых секунд, поддерживаемая в течение всего сеанса наблюдения (от нескольких сотен секунд до нескольких десятков минут). Кроме того, точность наведения и сопровождения на инфранизких скоростях особенно важна при проведении наблюдений с длинной экспозицией [1, 2].

Указанное качество наведения должно обеспечиваться для различных типов измерительных телескопов с вращающимися массами от нескольких десятков килограммов до нескольких десятков тонн. И это при наличии возмущающих неравномерных моментов от сил вязкого и сухого трения, в том числе в подшипниковых узлах, кабельном переходе, при переменных (зубцовых) моментах электродвигателя, ветровых и динамических нагрузках, а также с учетом конечной жесткости конструкции ОПУ и ее резонансных частот.

В связи со всем вышесказанным к основным проблемам, возникающим при создании следящих электроприводов комплексов высокоточных оптических измерений, относятся:

- необходимость обеспечения широкого диапазона скоростей слежения (до 20 000) при

малых значениях среднеквадратичных ошибок (1–2”);

- необходимость обеспечения плавного движения оптической оси комплекса при инфранизких скоростях слежения (до единиц угловых секунд за секунду) в условиях жесткости конструкции ОПУ и возможности возникновения механического резонанса на частотах от единиц до нескольких десятков герц;
- недостаточно полное соответствие реальных параметров механики осей ОПУ расчетным значениям, представляемым их разработчиками, что не позволяет оперировать достоверной моделью на этапе проектирования системы управления.

Анализ основных факторов, влияющих на характеристики высокоточных электроприводов, приводит к идее максимального упрощения кинематических передач, если это допускается компоновочной схемой энергетической установки. Радикальное же решение вопроса состоит в полном отказе от промежуточных механических связей между исполнительным двигателем и рабочим механизмом, вплоть до создания интегрированного устройства, в состав которого входят двигатели, датчики угла и скорости [3].

Таким образом, основные функциональные характеристики данных комплексов в значительной степени определяются необходимой точностью слежения за наблюдаемыми объектами. Как было отмечено выше, в решении подобных задач важную роль играет конструктивное исполнение всех элементов измерительного телескопа и в первую очередь осей его опорно-поворотного устройства, пред-

ставляемых в процессе моделирования и проектирования сервоприводов, как правило, многомассовыми моделями (рис. 3). Угловая частота резонанса механизма оси, вызванная крутильными деформациями, в конечном итоге определяет полосу пропускания частот контуров регулирования системы управления и, как следствие, ее быстродействие [1, 2].

В этих условиях именно на сервопривод возлагается задача компенсировать все возможные несовершенства конструкции механических узлов телескопа, его кабельного перехода и обеспечить заданную точность при относительно невысоком быстродействии системы, определяемом низкой резонансной частотой осей ОПУ. При этом сервоприводы измерительных телескопов необходимо проектировать с учетом дискретности протекания электромагнитных и электромеханических процессов, нелинейностей, упругих связей, сил трения, возмущающих воздействий со стороны подшипников и кабельного перехода, значительно усложняющих процессы управления [1, 2].

Структурно комплексы высокоточных оптических измерений содержат двухканальные (по азимуту и углу места) энергетические и информационные подсистемы.

Энергетическая подсистема (ЭП) включает силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового и электромеханического преобразователей и обеспечивает протекание процессов электромеханического преобразования энергии. ЭП определяет предельно достижимые динамические характеристики электроприводов комплекса (максимальные скорости и ускорения следящих осей)

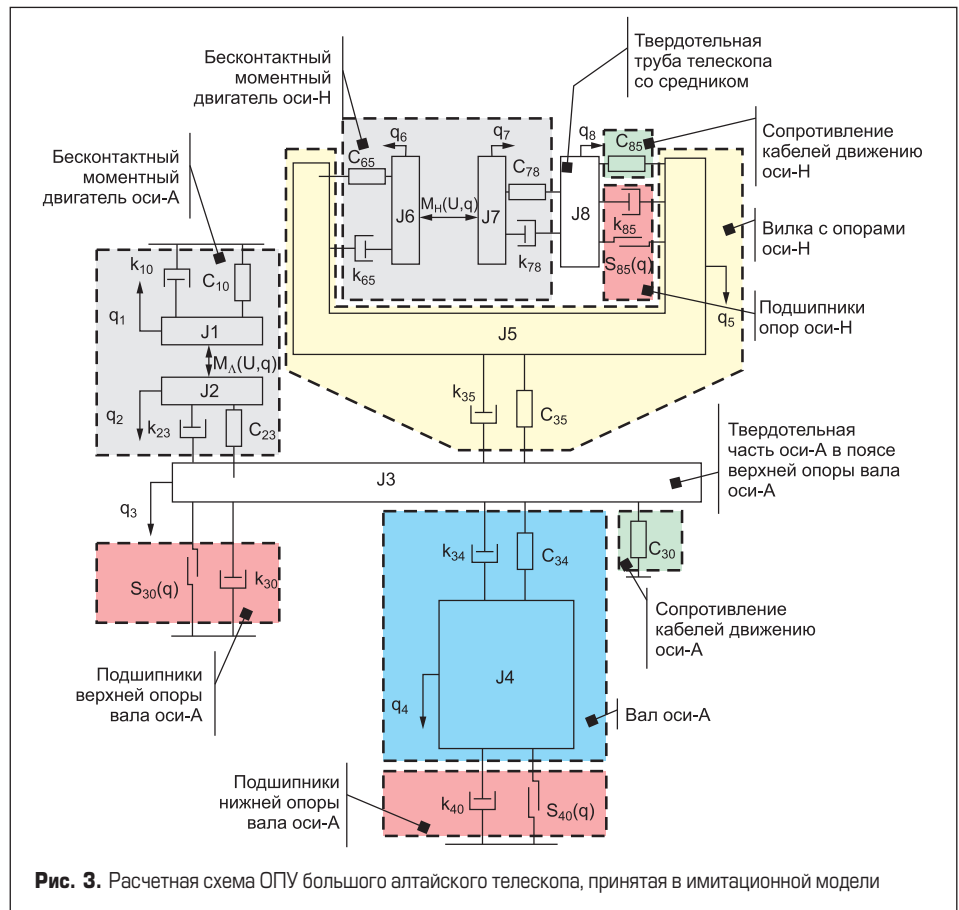


Рис. 3. Расчетная схема ОПУ большого алтайского телескопа, принятая в имитационной модели

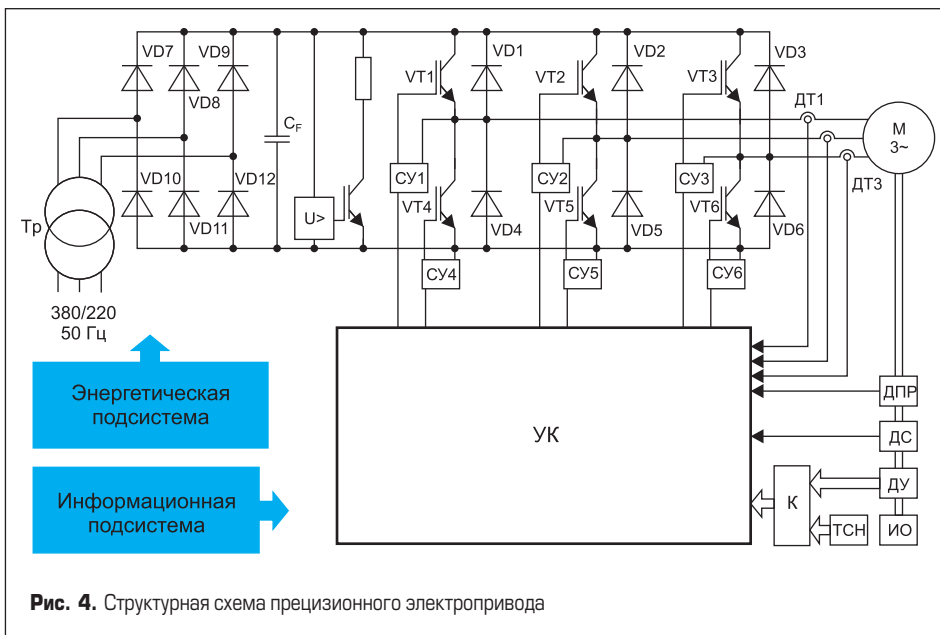


Рис. 4. Структурная схема прецизионного электропривода

и в значительной степени — массогабаритные показатели систем управления. Причем следует иметь в виду, что в электроприводах, работающих на нагрузку с упругими связями, к ЭП предъявляются требования по достижению больших значений ускорения с целью демпфирования этих колебаний.

В качестве электромеханических преобразователей в последних разработках НППЦ «ПЭ» используются синхронные машины с постоянными магнитами на роторе, которые характеризуются большим отношением вращающего момента к моменту инерции ротора, определяющим предельное быстродействие машины.

Информационная подсистема обеспечивает сбор информации от датчиков обратных связей, реализацию цифровых контуров регулирования координат системы, выработку многофазных широтно-модулированных сигналов управления автономными инверторами напряжения, оперативную диагностику и отработку аварийных ситуаций, связь с компьютером верхнего уровня иерархии.

В качестве датчиков положения оси инструмента в современных системах чаще всего применяются высокоточные оптические энкодеры

с разрешающей способностью на уровне 0,01–0,05". Ведущие фирмы, производящие подобные датчики, оснащают свои изделия специализированными высокоскоростными последовательными интерфейсами. В качестве примера можно привести интерфейс EnDat (фирма Heidenhain) и интерфейс BISS (фирма Renishaw), обеспечивающие передачу информации со скоростью до 10 Мбит/с с аппаратным обеспечением командного протокола обмена информацией и контроля ее достоверности.

Для управления вентильными двигателями во всех проектах НППЦ «ПЭ» предусмотрены автономные инверторы напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Применение многоуровневых топологий инверторов напряжения в системах прецизионного сервопривода позволяет обеспечить ряд существенных преимуществ, в основном за счет того, что данные преобразователи сочетают два типа модуляции: амплитудную и широтно-импульсную [4].

К основным достоинствам многоуровневых инверторов напряжения для систем прецизионного электропривода, по сравнению с классическими двухуровневыми топологиями, следует отнести:

- снижение пульсаций электромагнитного момента;
- расширение диапазона регулирования скорости;
- исключение необходимости использования дорогостоящих высоковольтных ключей, которые характеризуются малой надежностью и большими коммутационными потерями;
- обеспечение высоких энергетических показателей качества электроэнергии, как на стороне нагрузки, так и на стороне питающей сети за счет формирования многоступенчатой кривой выходного напряжения [5, 6, 7].

Применение многоуровневых преобразователей частоты позволяет формировать многоступенчатый выходной сигнал, который с увеличением числа уровней приближается к синусоидальному. Благодаря этому меньше искажается форма генерируемых преобразователем напряжения и тока, что, в свою очередь, позволяет обеспечить наилучшие энергетические показатели как на стороне нагрузки, так и на стороне сети. Основными показателями качества электроэнергии при этом, как правило, являются спектральные критерии — коэффициенты искажения тока и напряжения, именуемые в англоязычной литературе THD (total harmonic distortion):

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1}; THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1}. \quad (1)$$

Эти критерии оперируют только действующими значениями тока I_k и напряжения U_k , фазовый спектр высших гармоник не учитывается. Такую оценку допустимо использовать лишь для источников питания общего применения: в том случае, если в качестве нагрузки выступает частотно-регулируемый электропривод, который, в сущности, является активно-индуктивной нагрузкой, чьи параметры зависят от режима работы и изменяются в широких пределах. Эти критерии не могут обеспечить корректной оценки качества электроэнергии для прецизионных сервоприводов [4, 8].

Важно отметить, что за счет коммутации более низких напряжений многоуровневые преобразователи обеспечивают лучшую электромагнитную совместимость, что позволяет исключить дорогостоящие и крупногабаритные сетевые фильтры [9, 11].

Уменьшение величины коммутируемого напряжения позволяет пропорционально расширить диапазон регулирования напряжения на нагрузке за счет реализации более низких значений минимальной скорости электропривода n_{min} , пропорциональной произведению минимально возможной относительной продолжительности подключения нагрузки к цепи источника питания γ_{min} и величины коммутируемого напряжения источника питания U_d (U_d — величина коммутируемого напряжения питания только одного уровня):

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}}; n_{min} \sim \gamma_{min} U_d, \quad (2)$$

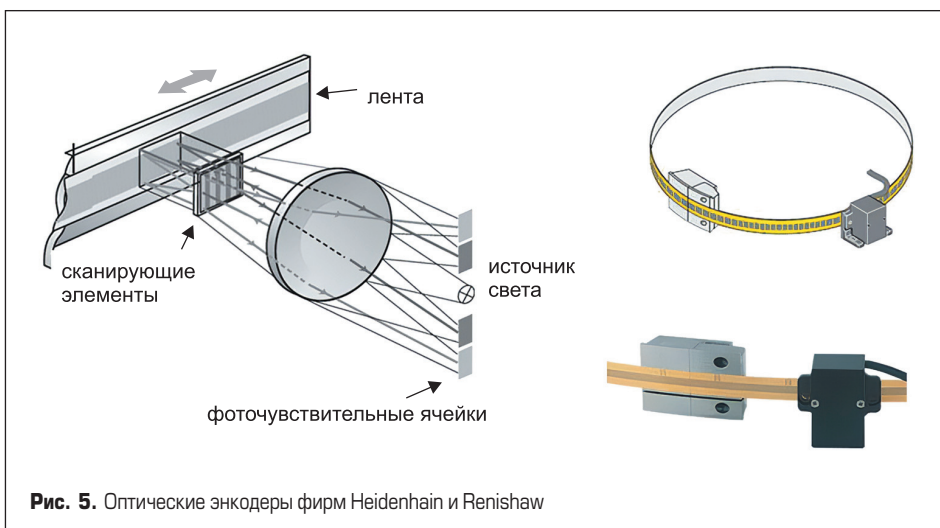


Рис. 5. Оптические энкодеры фирм Heidenhain и Renishaw

где n_{min} и n_{max} — максимальная и минимальная скорость вращения при постоянной нагрузке на валу двигателя [4].

Таким образом, разделение напряжения источника питания на n уровней увеличивает диапазон регулирования скорости электропривода D в n раз [4].

Минимально возможная длительность импульсов ШИМ обусловлена конечным временем переключения силовых ключей, что делает необходимым введение задержки на включение последовательно подсоединенных транзисторов инвертора. Данная задержка, именуемая «мертвое время», оказывает существенное влияние на линейность регулировочной характеристики инвертора напряжения при малых значениях относительной продолжительности подключения нагрузки к цепи источника питания, когда длительности формируемых управляющих импульсов становятся соизмеримы с величиной «мертвого» времени. При этом важно отметить, что его величина не только определяет зону нечувствительности, ограничивая минимальную скорость электропривода, но и приводит к снижению амплитуды основной гармоники выходного напряжения и тока во всем диапазоне регулирования [12].

Однако, как отмечалось, многоуровневые инверторы позволяют использовать полупроводниковые ключи, рассчитанные на меньшие рабочие напряжения и обладающие меньшим временем переключения [4, 5]. Соответственно, с увеличением числа уровней преобразователя снижается величина «мертвого» времени, что дополнительно расширяет диапазон регулирования напряжения и тока, сокращая зону нечувствительности регулировочной характеристики данного устройства.

В таблице представлено сравнение параметров МОП-транзисторов линейки N-Channel Power MOSFET (Infineon Technologies). Откуда видно, что повышение рабочего напряжения транзистора в 2 раза (от полутора до трех раз) увеличивает сопротивление канала в открытом состоянии и в 1,5–2 раза увеличивает время коммутации.

На рис. 6 представлены результаты моделирования электропривода с двухуровневым и пятиуровневым инвертором напряжения в линейной зоне ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой, частота модуляции 20 кГц, мертвое время 2 мкс, частота основной гармоники 50 Гц (I_s — ток статора, M_a — индекс модуляции амплитуды). Моделирование производилось в пакете программ MatLab+Simulink. Из полученных результатов видно, что применение многоуровневого инвертора позволяет в 4 раза уменьшить зону нечувствительности и на 5–6% увеличить амплитуду основной гармоники выходного напряжения и тока во всем диапазоне регулирования.

В свою очередь, применение низковольтных транзисторов позволяет не только расширить диапазон регулирования выходного напряжения инвертора, но и уменьшить величину коммутационных потерь, которые при идентичной нагрузке и одинаковых параметрах звена постоянного тока, прежде всего, зависят от частоты коммутации и времени переключения силовых ключей [13].

Таблица. Параметры силовых МОП-транзисторов

U_{Ds}	150 В		300 В	
Infineon Technologies, N-Channel Power MOSFET	BSB165N15NZ3 G	BSZ900N15NS3 G	IPP410N30N	BSC13DN30NSFD
I_D, A	45	14	44	16
$R_{ON}, m\Omega$	13,1	74	36	114
$T_{off}, нс$	20	8	25	12
$T_{off}, нс$	24	11	51	23

Более того, многоуровневые инверторы формируют многоступенчатое выходное напряжение, форма кривой которого с увеличением числа уровней приближается к синусоидальной, следовательно, для получения идентичного качества формируемого тока требуется меньшая частота коммутации, чем в двухуровневом инверторе, что также ведет к снижению коммутационных потерь в преобразователе.

Важно отметить, что в преобразователе помимо коммутационных потерь присутствуют и статические потери, обусловленные сопротив-

лением открытого канала ключей. Увеличение числа последовательно соединенных ключей в многоуровневых инверторах должно приводить к росту статических потерь, однако ключи, рассчитанные на меньшие напряжения, имеют меньшие значения сопротивления открытого канала (таб.), что во многих случаях приводит к обратному эффекту [14].

Помимо «мертвого» времени, искажение регулировочной характеристики преобразователя и формы генерируемых токов вызывает и нелинейность ВАХ транзисторов инвертора (рис. 7) [12].

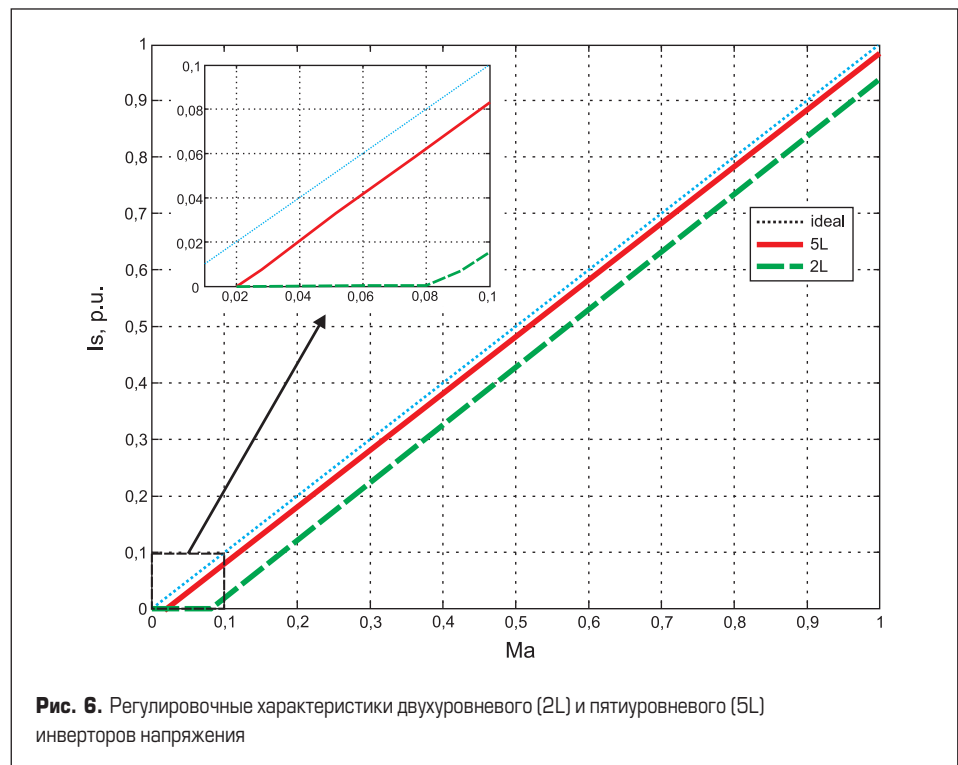


Рис. 6. Регулировочные характеристики двухуровневого (2L) и пятиуровневого (5L) инверторов напряжения

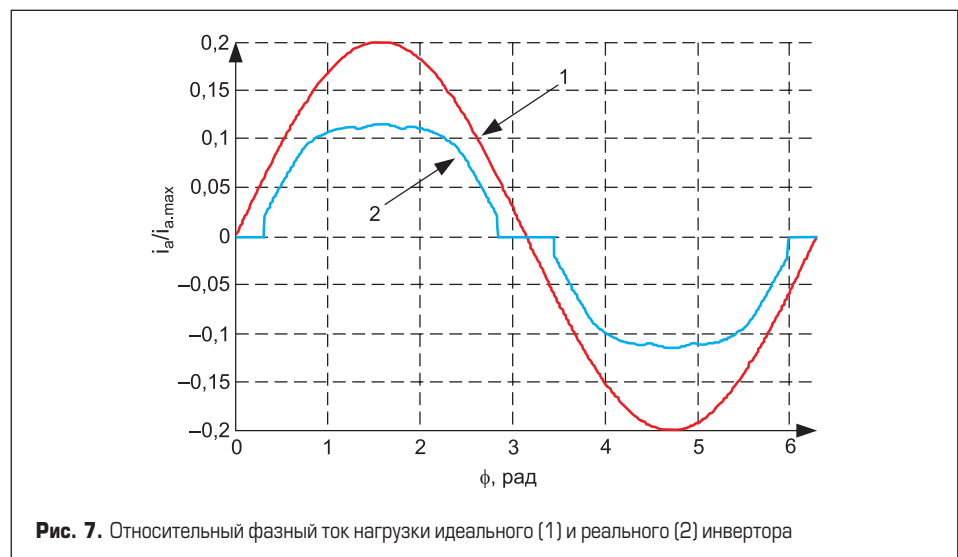


Рис. 7. Относительный фазный ток нагрузки идеального (1) и реального (2) инвертора

К качеству выходного тока инвертора сервоприводов высокоточных комплексов различного назначения предъявляются высокие требования, необходимые для обеспечения минимальной погрешности воспроизведения энергетическим каналом преобразователя управляющего сигнала, как правило, синусоидальной формы [8].

В зависимости от числа уровней базовых векторов напряжения на выходе преобразователя, а также способа формирования выходного напряжения можно выделить две основные схемы многоуровневых преобразователей [7, 11]:

- с блокирующими диодами;
- каскадная на H-мостах.

Каждая топология имеет свои достоинства и недостатки, но сегодня наиболее широкое применение в электроприводах переменного тока нашла схема многоуровневого инвертора с блокирующими диодами [11].

Однако улучшение энергетических показателей качества электроэнергии в нагрузке и источнике питания достигается не только за счет применения той или иной топологии

преобразователя, но и за счет совершенствования алгоритмов управления силовыми ключами. В последнее время большое внимание уделяется исследованию алгоритмов пространственно-векторной модуляции, отличающейся высоким уровнем основной гармоники выходного напряжения, низким коэффициентом искажения тока в нагрузке, меньшими коммутационными потерями и хорошей совместимостью с микропроцессорными системами управления. Но повысить качество формируемого напряжения и тока нагрузки можно и с применением классических алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) за счет перехода от постоянной частоты модуляции к переменной.

Качество преобразования энергии инвертором в прецизионном сервоприводе определяется величиной пульсаций электромагнитного момента двигателя. Известно [15], что его значение равно

$$M = C |I| \sin \varphi, \quad (3)$$

где

$$C = \frac{3z_p L_m}{2L_R} |\Psi_R| \approx \text{const},$$

некоторый практически постоянный коэффициент, величина которого определяется числом пар полюсов двигателя z_p , главной индуктивностью L_m , индуктивностью ротора L_R и модулем вектора его потокосцепления $|\Psi_R|$; $|I|$ — модуль вектора тока статора; φ — угол между векторами тока статора и потокосцепления ротора. Таким образом, пульсации электромагнитного момента можно оценить по пульсациям модуля вектора тока статора.

Для этого можно использовать универсальный статистический показатель мощности отклонений — коэффициент вариации CV (coefficient of variation), обеспечивающий достоверную оценку пульсаций в отличие от оценки, основанной на амплитудном спектре гармоник тока, используемой THD:

$$CV_I = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (|I|(t) - \bar{|I|})^2 dt}}{\bar{|I|}}, \quad (4)$$

где

$$\bar{|I|} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} |I|(t) dt$$

среднее значение модуля вектора тока статора за период основной гармоники тока T_1 в установившемся режиме работы.

Рассмотрим пульсации тока нагрузки пятиуровневого инвертора напряжения при различных алгоритмах управления: пространственно-векторной ШИМ (ПВМ), синусоидальной ШИМ (СМ) и ШИМ с премодуляцией третьей гармоникой (СМП).

Существенной особенностью ПВМ является возможность формирования базовых векторов в каждом периоде модуляции шестью различными последовательностями (рис. 8), в результате чего образуются шесть различных траекторий коммутации и спектров пульсаций модуля вектора тока нагрузки [8].

Результаты моделирования статических режимов работы инвертора в линейной области ПВМ при всех возможных последовательностях формирования базовых векторов с симметричной RL -нагрузкой ($\cos \varphi = 0,7$) при частоте основной гармоники 50 Гц и частоте ШИМ 2 кГц показаны на рис. 9.

Из рис. 9 следует, что при переходах с одного уровня модуляции на другой ($M_a = 0,25; 0,5; 0,75$) происходит резкое изменение пульсаций вектора тока статора, обусловленное изменением алгоритма коммутации силовых ключей. Очевидно, что минимальный уровень пульсаций соответствует алгоритму, формирующему нижнюю границу области возможных значений CV. В дальнейшем только эта кривая будет рассматриваться в качестве характеристики ПВМ при сравнении алгоритмов управления.

При реализации алгоритма синусоидальной модуляции в многоуровневом инверторе

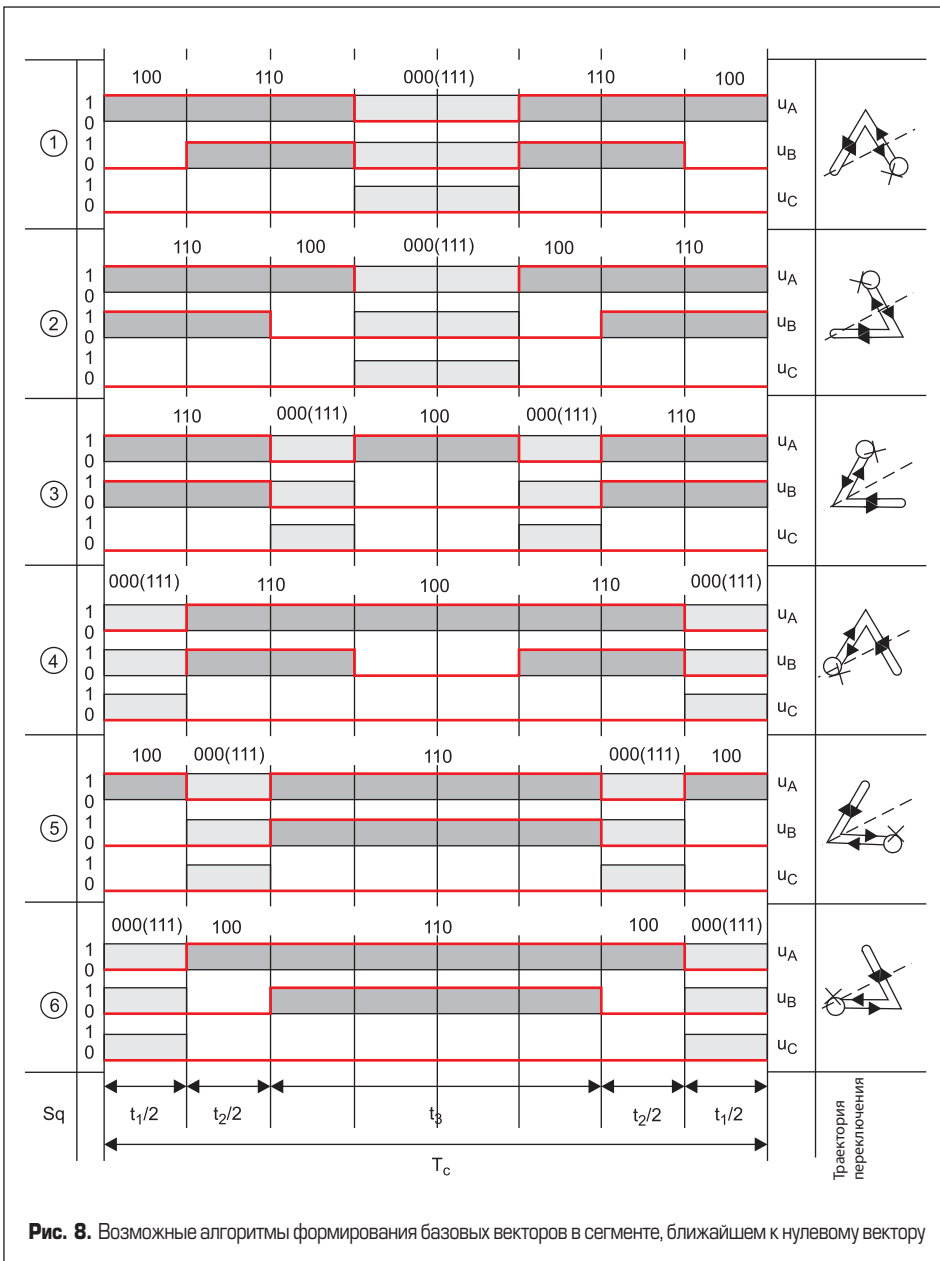


Рис. 8. Возможные алгоритмы формирования базовых векторов в сегменте, ближайшем к нулевому вектору

напряжения коммутационные функции силовых ключей можно формировать, например, путем сравнения синусоидального сигнала задания $u^*(t) = M_a \sin(2\pi f_0 t)$, где $0 < M_a < 1$ — индекс модуляции, а f_0 — частота основной гармоники напряжения инвертора, с пилообразными сигналами, содержащими постоянную составляющую, соответствующую зоне модуляции (рис. 10):

$$u_{m[k]}(t) = \frac{1}{L-1} \left\{ \text{sign}(k) \frac{1+2(|k|-1)}{2} + \frac{\arcsin[\sin(2\pi f_m t)]}{\pi} \right\}, \quad (5)$$

где: L — число уровней инвертора напряжения; f_m — частота сигнала модуляции; $k = -(L-1), -(L-2), \dots, 1, \dots, (L-2), (L-1)$ — номер зоны модуляции [4, 7].

Аналогичным образом, за счет добавления к синусоидальным фазным сигналам задания сигналов предмодуляции с частотой третьей гармоники, реализуются алгоритмы ПШИМ и ШИМ с пассивной фазой (ПФШИМ), позволяющие увеличить основную гармонику выходного напряжения инвертора примерно на 15,5% [15, 16].

На рис. 11 представлены результаты моделирования различных способов ШИМ при фиксированной частоте модуляции, равной 2 кГц, и постоянной частоте основной гармоники, равной 50 Гц. Из полученных данных следует, что СМП обеспечивает наименьшие пульсации годографа вектора тока практически во всем диапазоне модуляции, особенно при $M_a < 0,5$.

Следует отметить, что с уменьшением индекса модуляции амплитуды преобразуемая инвертором мощность уменьшается, что ведет к соответствующему уменьшению мощности потерь в самом преобразователе. Следовательно, по мере уменьшения амплитуды вектора тока можно увеличивать частоту модуляции, снижая тем самым пульсации вектора тока без превышения допустимого уровня потерь в силовых ключах.

Однако увеличение частоты модуляции при глубоком регулировании скорости следует ограничивать, так как величина нелинейности регулировочной характеристики обусловлена соотношением величин «мертвого» времени и периода ШИМ.

Заключение

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

1. Применение многоуровневых инверторов напряжения в прецизионных электроприводах позволяет:

- уменьшить зону нечувствительности регулировочной характеристики и, как следствие, расширить диапазон регулирования скорости электропривода пропорционально увеличению числа уровней преобразователя;
- использовать полупроводниковые ключи, рассчитанные на меньшие рабочие на-

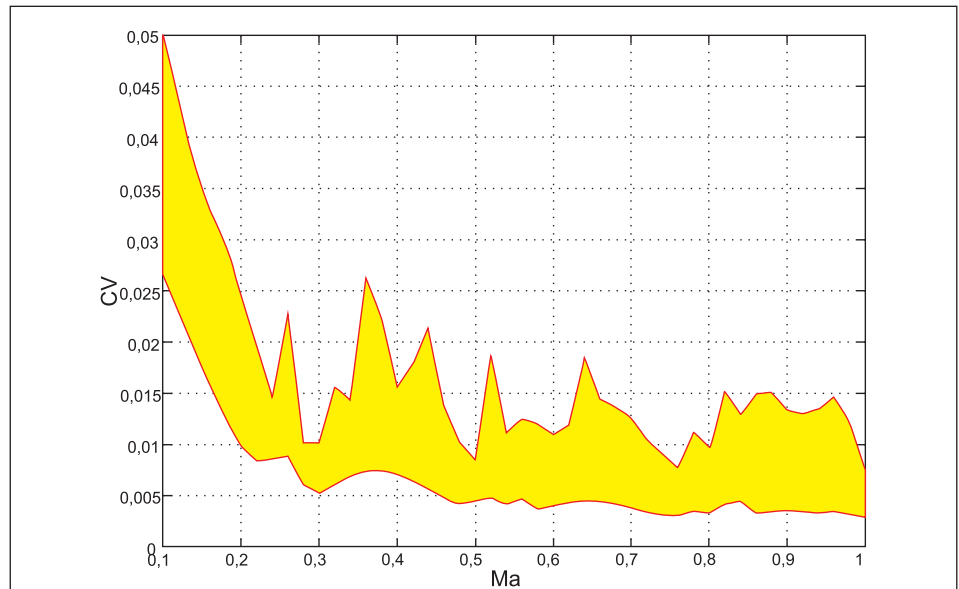


Рис. 9. Коэффициент вариации вектора тока статора при ПВМ

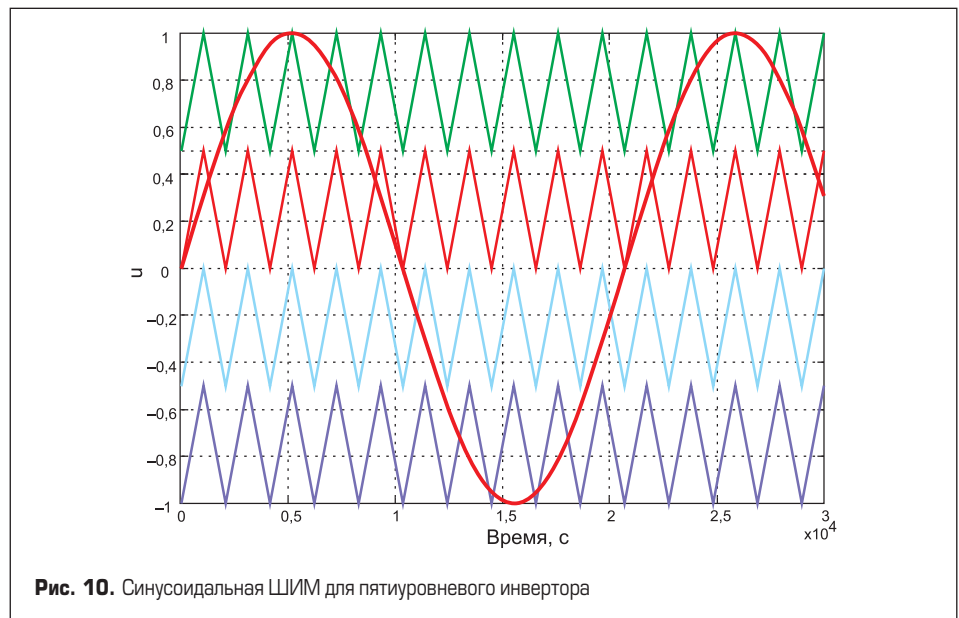


Рис. 10. Синусоидальная ШИМ для пятиуровневого инвертора

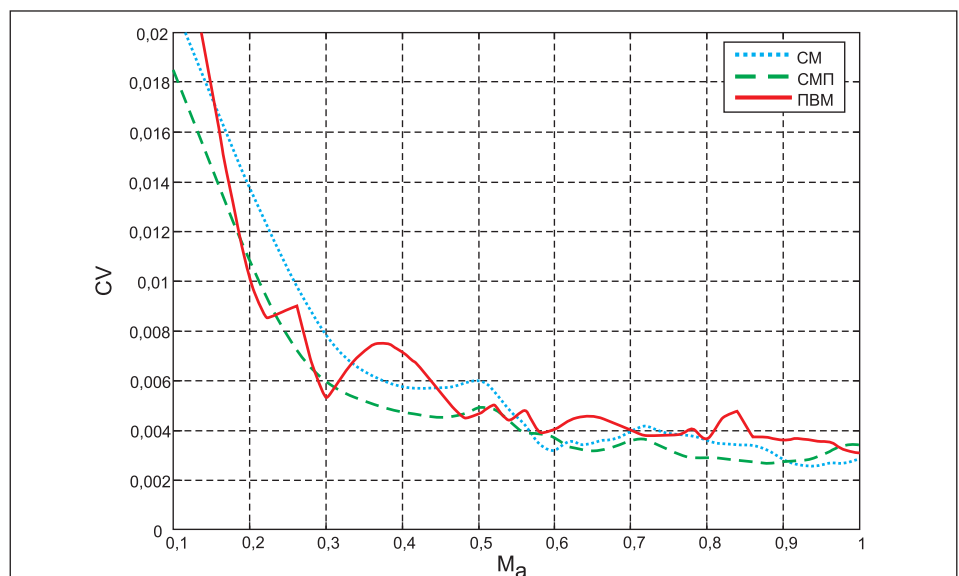


Рис. 11. Коэффициент вариации вектора тока статора при различных способах ШИМ пятиуровневого инвертора

пряжения, снижая тем самым статические и коммутационные потери, а также величину требуемого «мертвого» времени.

2. Достоверной оценкой качества преобразования энергии инвертором является коэффициент вариации пульсаций модуля вектора тока статора, позволяющий учесть как амплитудный, так и фазовый спектр высших гармоник пульсаций.
3. При реализации алгоритма ПВМ изменение последовательности формирования базовых векторов может приводить к увеличению уровня пульсаций выходного тока инвертора и электромагнитного момента двигателя, что обязательно требует моделирования работы инвертора на этапе разработки.
4. Изменение частоты модуляции в зависимости от величины амплитуды вектора тока статора приводит к существенному улучшению гармонического состава тока нагрузки при обеспечении нормального теплового режима работы преобразователя во всем диапазоне регулирования.

Таким образом, многоуровневые инверторы напряжения по сравнению с классическими двухуровневыми топологиями имеют ряд существенных преимуществ, в связи с чем, несмотря на большое количество полупроводниковых элементов и относительную сложность схем и алгоритмов управления, являются перспективным решением для реализации систем прецизионного электропривода.

Литература

1. Васильев В. Н., Томасов В. С., Шаргородский В. Д., Садовников М. А. Состояние и перспек-

тивы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. № 6.

2. Садовников М. А., Томасов В. С., Толмачев В. А. Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. № 6.
3. Venturini M., Vismara A. Design and test of very large diameter, brushless permanent magnet torque motors for the very large telescope. Proceedings of the powersystems world conference Las Vegas, USA, 1996.
4. Томасов В. С., Усольцев А. А., Вертегел Д. А. Проблемы и особенности использования многоуровневых инверторов в системах прецизионного сервопривода // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. № 12.
5. Мильский К., Остриров В. Рациональные схемы преобразователей частоты для мощных синхронных индукторных электроприводов // Электронные компоненты. 2008. № 11.
6. Лазарев Г. Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода // Построение различных схем. Новости электротехники. 2005. № 2.
7. Донской Н., Иванов А., Матисон В., Ушаков И. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики // Силовая электроника. 2008. № 1.
8. Tomasov V. S., Usoltsev A. A., Vertegel D. A., Strzelecki R. Space vector modulation in multilevel inverters of the servo drives of the trajectory measurements telescopes // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7.
9. Карташев Е., Колпаков А. Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями // Силовая электроника. 2009. № 2.
10. Кумаков Ю. А. Инверторы напряжения со ступенчатой модуляцией и активная фильтрация высших гармоник // Новости электротехники. 2005. № 6.
11. Михеев К. Е., Томасов В. С. Анализ энергетических показателей многоуровневых полупроводниковых преобразователей систем электропривода // Научно-технический вестник ИТМО. 2012. № 1.
12. Томасов В. С., Ловлин С. Ю., Тушев С. А., Смирнов Н. А. Искажение выходного напряжения широтно-импульсного преобразователя прецизионного электропривода // Вестник ИГЭУ. 2013. № 1.
13. Воронин И. Интегральный силовой модуль IGBT для трехуровневых инверторов напряжения с повышенной эффективностью преобразования электроэнергии // Силовая электроника. 2013. № 6.
14. Семенов В. В., Стрункин Г. Н., Попов С. А. Потери мощности в инверторах с однополярной и двуполярной широтно-импульсной модуляцией // Электротехника и электроэнергетика. 2007. № 1.
15. Усольцев А. А. Современный асинхронный электропривод оптико-механических комплексов. Учебное пособие. СПбГУ ИТМО, 2011.
16. Чаплыгин Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией. М.: МЭИ, 2009.