

**Н.Н.Казачковский, канд. техн. наук**

(Украина, Днепропетровск, ГВУЗ "Национальный горный университет")

## СОВРЕМЕННЫЕ НИЗКОВОЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ

### Общая характеристика

Низковольтные (до 1000 В) преобразователи частоты (ПЧ) уже стали наиболее распространенной и наиболее продаваемой разновидностью преобразователей энергии для современного электропривода. Мировые продажи регулируемых электроприводов растут примерно на 5,3% в год (в Германии – на 10%). Доля же частотно-управляемых электроприводов в 2006 г. составила 87% общего объема продаж электроприводов. Основными областями применения ПЧ являются насосы, вентиляторы, грузоподъемные машины (подъемные краны, лифты), станки с программным управлением, упаковочное оборудование, технологические линии пищевой, химической и других отраслей промышленности. Основные признаки типичного низковольтного ПЧ на сегодня практически определились:

- силовая схема (рис. 1) – двухзвенная, состоящая из неуправляемого входного выпрямителя UZ1, автономного инвертора напряжения (АИН) UZ2 на IGBT-транзисторах и емкостного фильтра С;
- принцип управления силовыми ключами АИН – широтно-импульсная модуляция (ШИМ);
- система управления преобразователем и электроприводом – цифровая;
- диалог с пользователем возможен с помощью пульта с клавиатурой и дисплеем либо персонального компьютера.

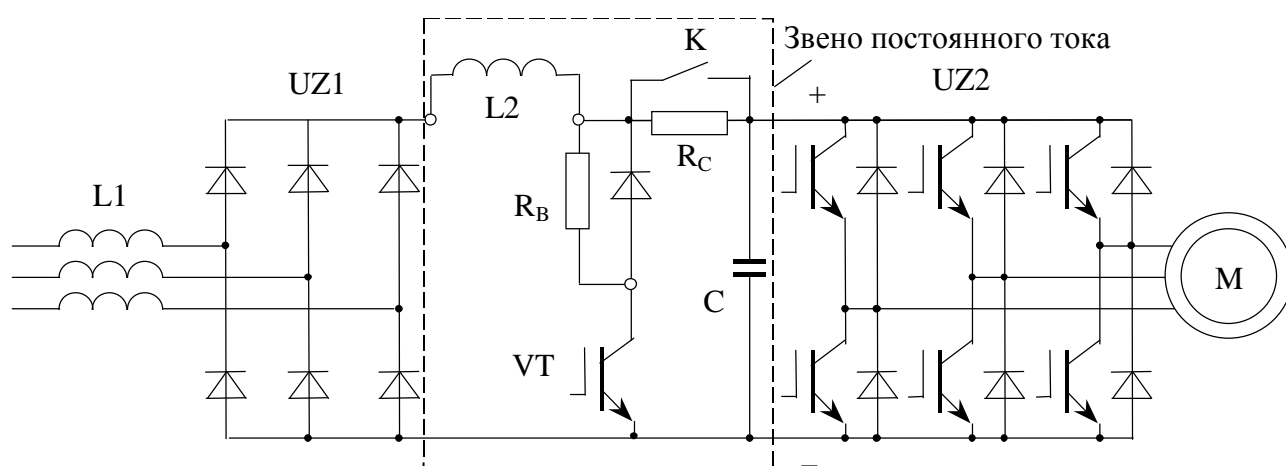


Рис. 1. Силовая схема двухзвенного ПЧ с АИН

На украинском рынке имеется большой выбор ПЧ, отличающихся мощностью, функциональными возможностями и назначением. У большинства ведущих производителей имеется несколько серий ПЧ.

1. Преобразователи для механизмов с «переменным» моментом нагрузки

(снижающимся с уменьшением скорости). К таким (кстати, наиболее широко распространенным) механизмам относятся вентиляторы, насосы и центробежные компрессоры. Для них характерны длительный режим работы, медленное изменение нагрузки, невысокие перегрузки. Основной причиной применения ПЧ в таких механизмах является изменение расхода воды (воздуха) и необходимость в связи с этим регулирования производительности агрегата. Именно в механизмах такого рода применение ПЧ дает наиболее очевидный эффект в силу резкого снижения энергопотребления при уменьшении расхода. Срок окупаемости капиталовложений лежит в пределах от нескольких месяцев до полутора лет (в зависимости от диапазона колебаний расхода и практически независимо от установленной мощности). Отличием таких преобразователей является широкий диапазон мощности (до 2000 кВт), простые законы частотного управления (не требующие применения датчиков скорости), невысокая перегрузочная способность (обычно порядка 1,1-1,5 в течение 60 с), наличие прикладных функций для управления насосами и вентиляторами. Имеются отдельные серии для промышленного применения, такие как FC200 (Danfoss), FR-F740 (Mitsubishi), G7 (Omron), ATV61 (Schneider Electric). Выпускаются также специальные серии для систем горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха жилых и общественных зданий, например ACH550 (ABB), FC100 (Danfoss), L200 (Hitachi), FR-F540J (Mitsubishi), ATV21 (Schneider Electric), Affinity (Control Techniques).

2. *Высокофункциональные преобразователи для механизмов с «постоянным» моментом* (не зависящим от скорости). Нагрузка такого рода характерна для механизмов горизонтального (конвейеры, тележки) и вертикального (лифты, лебедки) перемещения грузов, перематывающих механизмов, упаковочного оборудования. Для них характерны частые пуско-тормозные режимы, высокие перегрузки (до двухкратных в течение 60 с), необходимость реверса и точной остановки, повышенные требования к точности и диапазону регулирования скорости. ПЧ такого рода обладают возможностью векторного управления с датчиком скорости (положения), рекуперации тормозной энергии в сеть переменного тока, прикладные функции, ориентированные на грузоподъемные механизмы. Мощность достигает 2400 кВт. Примерами могут служить такие ПЧ, как ACS800 (ABB), Unidrive SP (Control Techniques), FC300 (Danfoss), SJ700 (Hitachi), 9300 Vector (Lenze), FR-A740 (Mitsubishi), ATV71 (Schneider Electric). Некоторые производители (как, например, Omron и Schneider Electric) выпускают специальные серии ПЧ для лифтов с соответствующим набором прикладных функций (соответственно Varispeed L7 и ATV71L).

3. *Универсальные преобразователи*. Многие компании предлагают серии ПЧ, которые могут быть использованы для механизмов как с «постоянным», так и с «переменным» моментом нагрузки. Нередко для них нормируется несколько уровней номинальной мощности (большей мощности соответствует меньшая перегрузочная способность). Выпускаются серии как для простых механизмов малой мощности (небольшие насосы, вентиляторы, конвейеры, автоматические двери, шлагбаумы, тренажеры, рекламные щиты и т.п.) с невысокими требованиями к точности, быстродействию, диапазону регулирования скорости, так и серии с высокой функциональностью для применений, упомя-

нутых в п. 1 и 2.

4. *Сервопреобразователи* применяются в приводе механизмов, требующих в первую очередь регулирования положения. Поставляются такие преобразователи комплектно со специально разработанными двигателями (серводвигателями), а те в свою очередь – с датчиками положения. В качестве приводных двигателей чаще всего применяют синхронные с постоянными магнитами, работающие в режиме вентильного двигателя. К числу типичных прикладных функций сервоприводов относятся поиск нулевой точки, «электронный редуктор», синхронизация движения нескольких механизмов, стабилизация момента (тока), ведомый/ведущий. Мощность не превышает нескольких десятков кВт.

Большинство серий включает подсерии, предназначенные для сетей 200-240 (одно- и трехфазных), 380-480, 500-690 В. Диапазон частот выходного тока обычно составляет от нуля до нескольких сот Гц, достигая у некоторых ПЧ 5000 Гц. Столь высокие частоты могут быть востребованы, например, для питания высокоскоростных электрошпинделей.

### **Силовые схемы**

Как уже было сказано, входной выпрямитель двухзвенного ПЧ чаще всего неуправляемый. Для мощностей до 2,2 кВт (110 и 220 В) он может быть однофазным мостовым, до нескольких десятков кВт – трехфазным мостовым. Некоторые производители допускают питание ПЧ с трехфазным входным выпрямителем (3×220 В) от однофазной сети 220 В. Однако при этом необходимо снижать номинальную мощность как минимум на одну ступень, как максимум – вдвое. Для улучшения формы потребляемого из сети тока и снижения пульсаций выпрямленного напряжения в мощных ПЧ используют более сложные схемы выпрямления (12-, 18- и 24-пульсные) с последовательным или параллельным соединением трехфазных мостов по выходу и питанием их от отдельных вторичных обмоток трансформатора со сложными схемами соединения.

Зарядный ток конденсатора  $C$  при первом включении ПЧ небольшой мощности ограничивают резистором  $R_C$  (рис. 1), шунтируемым в рабочем режиме. В более мощных преобразователях могут быть применены специальные схемы заряда (в том числе с использованием тиристоров во входном выпрямителе  $UZ1$ ).

При переводе двигателя в тормозной режим энергия торможения накапливается в конденсаторе  $C$  звена постоянного тока. Разрядный ключ  $VT$  с тормозным резистором  $R_B$  служат для сброса тормозной энергии, накопившейся в конденсаторе  $C$  при длительных или частых торможениях (тем самым ограничиваются перенапряжения в звене постоянного тока). В ПЧ малой мощности разрядный ключ (в сервопреобразователях – и тормозной резистор) часто встроен, для более мощных заказываются по необходимости.

Дроссель звена постоянного тока  $L2$  и реакторы переменного тока  $L1$  используют для улучшения формы потребляемого из сети тока (реакторы  $L1$  кроме того ограничивают токи КЗ при замыкании на входе или выходе выпрямителя, компенсируют несимметрию напряжения сети, уменьшают взаимное влияние нескольких ПЧ, питающихся от общего источника).

Преобразователи мощностью свыше 17 кВт, работающие в режиме с час-

тыми торможениями, могут комплектоваться (вместо диодного) диодно-транзисторным активным выпрямителем (рис. 2). Это позволяет вернуть тормозную энергию в сеть переменного тока, обеспечить практически синусоидальную

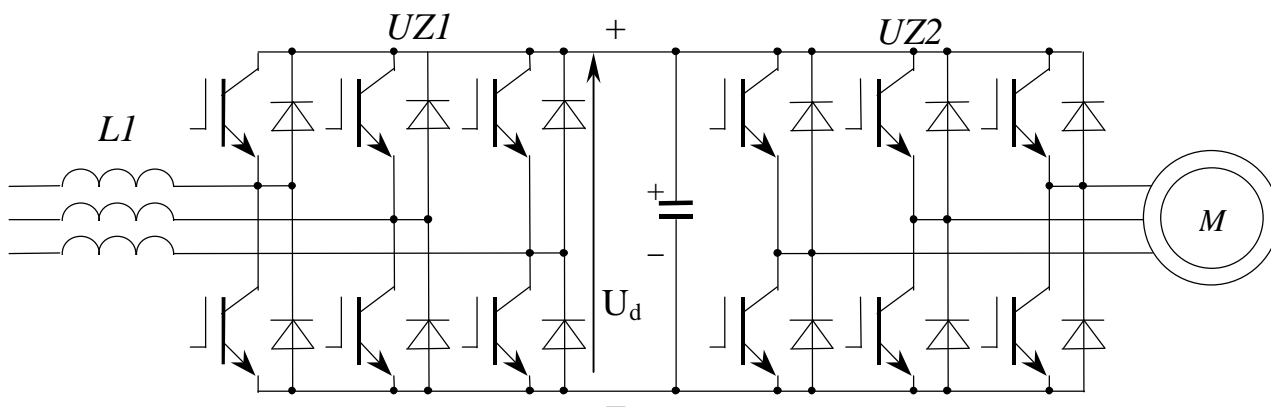


Рис. 2. Преобразователь частоты с активным выпрямителем

форму тока сети в режимах потребления и возврата энергии, стабилизировать напряжение в звене постоянного тока, снизить влияние колебаний напряжения сети на работу ПЧ. Использование сетевых реакторов  $L1$  в данном случае обязательно. Идентичность схем выпрямителя и инвертора позволяет унифицировать принципы управления ими (обычно используется ШИМ). Мало того, инверторы некоторых производителей можно использовать не только для двигательного режима по схеме на рис. 1, но и в качестве активных выпрямителей.

Схема АИН, изображенная на рис. 1 и 2, обеспечивает два уровня мгновенного выходного линейного напряжения:  $0$  и  $\pm U_d$ . Для улучшения формы выходного тока, расширения диапазона регулирования скорости, снижения перенапряжений на обмотке статора двигателя иногда применяют так называемые трехуровневые схемы, состоящие из 12 транзисторных ключей (рис. 3).

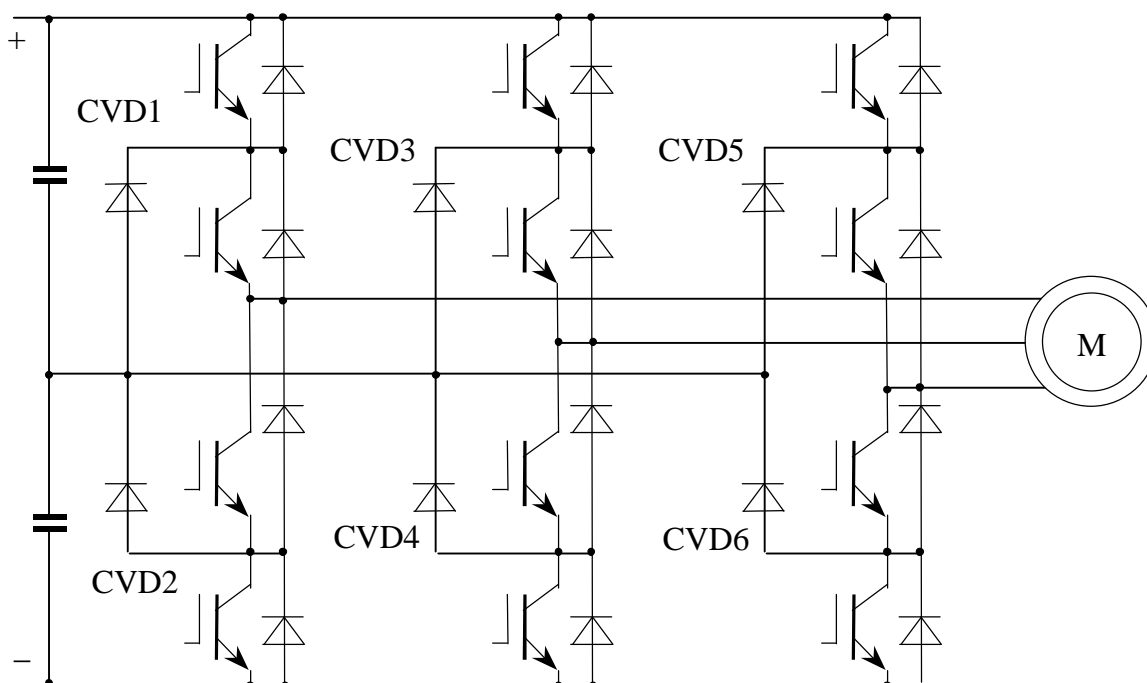


Рис. 3. Трехуровневый АИН

Вдвое большее количество ключей позволяет подключать каждую фазу нагрузки не только к крайним точкам звена постоянного тока, как на рис. 1, но и к средней его точке через средние транзисторы и кламперные диоды CVD1...CVD6. Благодаря этому в кривой мгновенного выходного напряжения появляется еще один уровень, снижается содержание высших гармоник в напряжении и токе, уменьшаются перепады мгновенного напряжения и обусловленные ими перенапряжения на дальнем конце кабеля. Низковольтные ПЧ с трехуровневым АИН выпускает компания Omron (серия G7). Гораздо чаще такие инверторы используются в ПЧ среднего напряжения (свыше 1000 В). По подобной схеме может быть построен и активный выпрямитель.

Силовые клеммы «+», «-» преобразователя обычно выведены наружу, что позволяет объединять звенья постоянного тока нескольких ПЧ. Тогда от одного или нескольких общих выпрямителей может одновременно питаться несколько инверторов (рис. 4). При этом возможна передача энергии торможения от одного АИН к другому, минуя сеть переменного тока, и поэтому тормозной резистор или активный выпрямитель могут не понадобиться. Наиболее очевидны преимущества такого решения в электроприводе перематывающих механизмов, где один двигатель всегда работает в двигательном режиме, другой – в рекуперативном, а также в подъемных кранах. Выпускаются ПЧ с одним выпрямителем и двумя инверторами (S120, Siemens). Широко применяется подобная схема питания в многодвигательных электроприводах станков с ЧПУ и промышленных роботов.

От низковольтного ПЧ может питаться и двигатель среднего напряжения. Для этого необходимо между ПЧ и двигателем включить повышающий трансформатор или автотрансформатор (на выходе ПЧ обязателен синусный фильтр для улучшения формы тока). Для подключения же ПЧ к сети среднего напряжения требуется понижающий трансформатор. Такое решение зачастую оказывается дешевле, чем применение ПЧ среднего напряжения. Кроме того, снижаются перенапряжения на обмотке статора, устраняются т.н. «подшипниковые» токи благодаря потенциальной развязке двигателя и ПЧ, возможно увеличение длины кабеля.

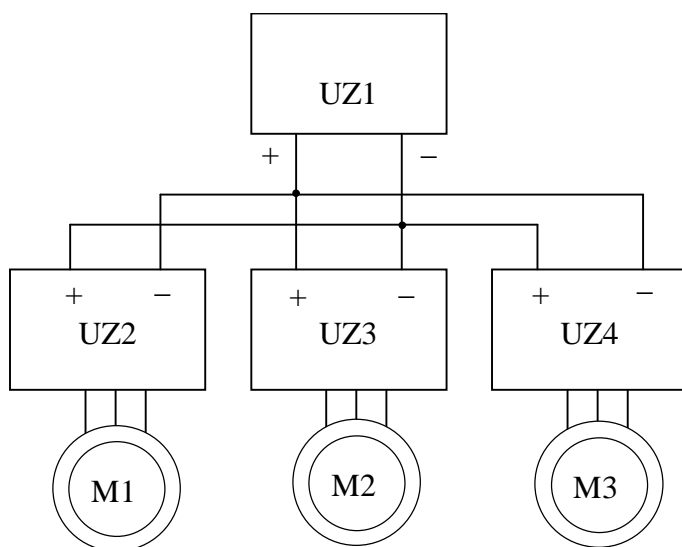


Рис. 4. Способ объединения звеньев постоянного тока

### Законы частотного управления

В подавляющем большинстве серийно выпускаемых двухзвенных ПЧ регулирование выходного напряжения и частоты осуществляется с применением широтно-импульсной модуляции. Используют два варианта ШИМ: синусоидальную и векторную. В первом случае каждая фаза инвертора имеет неза-

висимый канал управления, в котором путем сравнения высокочастотного опорного (обычно треугольного) и низкочастотного задающего синусоидального сигнала формируются сигналы управления ключами фазы со скважностью, изменяющейся по синусоидальному закону. Амплитуда и частота задающего сигнала определяют амплитуду и частоту первой гармоники выходного напряжения.

Векторная ШИМ предполагает формирование состояния АИН исходя из заданного обобщенного вектора выходного напряжения. Она обеспечивает снижение частоты коммутации ключей и несколько большее (примерно на 15%) выходное напряжение. Чтобы достичь того же уровня выходного напряжения, при синусоидальной ШИМ приходится использовать перемодуляцию (увеличение амплитуды задающей синусоиды сверх амплитуды опорного сигнала) или формировать задающий сигнал как сумму двух синусоид (первой и третьей гармоники). Результат в обоих случаях примерно одинаков: исключение коммутаций ключей в окрестностях амплитуды фазного напряжения, приводящее к увеличению действующего значения выходного напряжения, лучшему использованию двигателя по напряжению, но и некоторому ухудшению формы тока.

Несущая частота ШИМ в современных ПЧ обычно лежит в пределах 0,5-16 кГц (в некоторых случаях до 32 кГц) и может быть выбрана пользователем. При такой частоте модуляции форма выходного тока достаточно близка к синусоидальной. Следует, однако, заметить, что рост частоты переключения приводит к дополнительному нагреву силовых ключей. Поэтому при увеличении номинальной мощности ПЧ верхняя граница этого диапазона снижается вплоть до нескольких кГц. Кроме того, во многих ПЧ с целью предотвращения перегрева ключей предусмотрено автоматическое снижение частоты модуляции с ростом тока нагрузки или температуры ПЧ и уменьшением частоты выходного тока. Для снижения электромагнитных шумов двигателя частоту коммутации увеличивают до 8 кГц (за пределы слышимого человеческим ухом диапазона). Несколько лучшего результата можно добиться, используя функцию шумоподавления или «мягкую» ШИМ (автоматическое изменение частоты модуляции по случайному закону).

В современных ПЧ используются как скалярные, так и векторные законы частотного управления. В первом случае в процессе регулирования скорости изменяются действующее значение выходного напряжения и его частота (обратные связи обычно отсутствуют), во втором, помимо этого, контролируется рассогласование по фазе между токами, потокосцеплениями, напряжениями двигателя, а применение замкнутых систем регулирования обязательно. Скалярные законы наиболее просты и применяются в механизмах с невысокими требованиями к точности, быстродействию и диапазону регулирования скорости, векторные же обеспечивают более качественное регулирование благодаря применению датчиков скорости (положения) вала двигателя. В подавляющем большинстве случаев пользователь имеет возможность выбрать из нескольких вариантов тот закон частотного управления, который наиболее полно соответствует решаемой задаче. Рассмотрим доступные в современных ПЧ законы управления (в каждом конкретном образце их список, естественно, может быть

короче).

Закон для механизмов с «постоянным» моментом сопротивления предполагает пропорциональное изменение амплитуды напряжения и его частоты  $U/f = const$  (прямая 1 на рис. 5) в диапазоне частот от нуля до номинальной  $f_n$ . В этом диапазоне магнитный поток двигателя не изменяется и равен номинальному (не изменяется также и его перегрузочная способность). Точка с координатами  $(U_n, f_n)$  соответствует номинальному режиму двигателя.

Дальнейшее повышение выходной частоты вплоть до максимально допустимой  $f_{max}$  происходит при неизменном напряжении (линия 2), благодаря чему магнитный поток машины и перегрузочная способность снижаются.

Для механизмов с моментом, квадратично снижающимся с уменьшением частоты вращения (вентиляторы, насосы), применяют закон  $U/f^2 = const$ , которому соответствует вольт-частотная характеристика (ВЧХ) 3 на рис. 5. При использовании ее в подобных механизмах она обеспечивает меньшие потери в двигателе по сравнению с законом  $U/f = const$ . В случае работы насоса на магистраль с противодавлением зависимость момента от скорости отличается от квадратичной. Поэтому в некоторых случаях есть возможность изменять степень кривизны ВЧХ (линия 4).

Рассмотренные законы частотного управления предполагают, что активное сопротивление обмотки статора двигателя пренебрежимо мало. Для двигателей мощностью до 10 кВт такое допущение некорректно, и падение напряжения в этом сопротивлении под нагрузкой приводит к снижению магнитного потока и перегрузочной способности. В этом случае следует применять IR-компенсацию (линия 5), которая обеспечивает компенсацию падения напряжения в активном сопротивлении статора благодаря более высокому напряжению по сравнению с законом  $U/f = const$ . Для обеспечения повышенного начального пускового момента двигателя в механизмах с тяжелым пуском можно применять ВЧХ вида 6.

Для механизмов, регулярно работающих с неполной нагрузкой, предназначен закон минимального тока (или энергосберегающий закон). Для каждого уровня нагрузки автоматически подбирается такая величина напряжения, которой соответствует минимальное значение тока статора. Форма ВЧХ в этом случае зависит от параметров двигателя (вид ее подобен линии 7 на рис. 5). Для нагрузок, меньших номинальной, оптимальный уровень напряжения обычно также меньше номинального. Это обеспечивает снижение потерь в стали и обмотке статора двигателя.

Некоторые ПЧ имеют возможность задавать произвольную форму ВЧХ путем настройки координат нескольких точек в диапазоне частот  $0-f_n$  или вы-

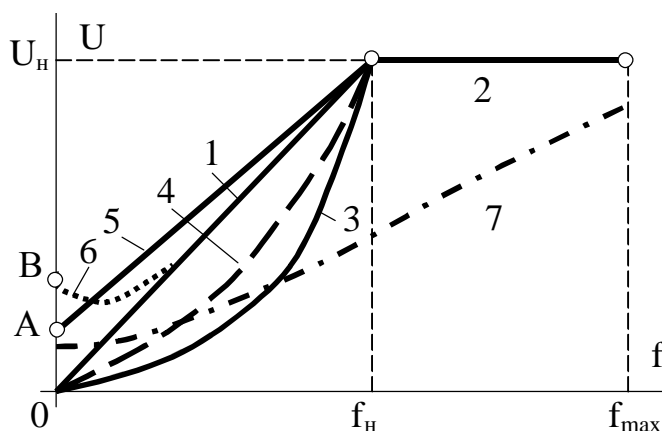


Рис. 5. Вольт-частотные характеристики

бирать ВЧХ различной формы из предлагаемого списка.

Для механизмов с повышенными требованиями необходимо применение векторных законов управления. Наиболее простым вариантом является так называемый бездатчиковый (бессенсорный) закон управления. Вместо непосредственного измерения скорости он предполагает ее косвенную оценку с помощью математической модели двигателя и измеренных напряжения и тока статора (датчики тока и напряжения имеются в каждом ПЧ). В результате механические характеристики электропривода становятся более жесткими, скорость меньше зависит от нагрузки, а устойчивое вращение возможно при меньших выходных частотах и больших нагрузках, нежели при использовании скалярных законов.

Наиболее совершенным является векторное управление со стабилизацией потока, для реализации которого необходим датчик скорости (положения). Он обеспечивает наибольшее быстродействие, точность поддержания скорости, устойчивость регулирования в широком диапазоне изменения скорости (до 1:1000 от номинальной). Интерфейс, обеспечивающий возможность работы с датчиком положения, обычно либо находится на борту ПЧ, либо имеется на опциональной плате, встраиваемой в ПЧ.

Известно, что синхронные двигатели с постоянными магнитами имеют существенно лучшие массогабаритные показатели и меньший момент инерции по сравнению с асинхронными. Поэтому наибольшее распространение такие двигатели получили в сервоприводах. В последние годы все больше производителей предполагает питание даже от общепромышленных ПЧ не только асинхронных, но и синхронных двигателей. Для них возможно применение как скалярных, так и векторных законов управления (включая обеспечение режима вентильного двигателя).

### **Системы автоматического регулирования**

Помимо системы управления собственно преобразователем, микропроцессорный контроллер, имеющийся в составе ПЧ, обеспечивает и регулирование координат электропривода (момента, частоты вращения, положения). Преимущество цифрового управления здесь проявляется в возможности изменения не только настроек, но и структуры системы регулирования лишь путем перепрограммирования.

В случае использования скалярных законов система регулирования скорости обычно разомкнутая. Обеспечивается ограничение нагрузок, темпов разгона и торможения.

Все векторные законы предполагают прямое (с применением датчика) или косвенное (с помощью наблюдателя) измерение скорости. Стало уже стандартом применение в ПЧ с векторным управлением автоматической настройки регуляторов. Перед активизацией этой функции необходимо ввести в ПЧ паспортные данные двигателя (обычно для этого достаточно параметров, приведенных на его табличке). В процессе автонастройки преобразователь, подавая на двигатель тестовые сигналы, определяет параметры его схемы замещения, момент инерции электропривода (в некоторых случаях также механические потери и потери в стали двигателя, кривую его намагничивания), и использует их



для настройки регуляторов. При автонастройке привода с вентильным двигателем определяется также фазовый угол датчика положения (взаимная фазировка роторов датчика и двигателя). В ряде случаев полученные настройки можно откорректировать вручную. Возможны варианты активизации автонастройки: вручную, автоматически после каждого включения ПЧ и непрерывно в процессе эксплуатации электропривода (в последнем случае реализуется возможность адаптивного управления, например, с учетом изменения температуры обмоток двигателя).

Регулятор скорости (РС) всегда пропорционально-интегральный (ПИ). Для повышения устойчивости и точности регулирования иногда применяются дополнительные средства: гибкая обратная связь по скорости, адаптация РС к изменению параметров двигателя (например, степени насыщения его магнитопровода), фильтры в прямом канале регулирования, предотвращающие резонансные явления в механической части электропривода (в сервоприводах они применяются практически повсеместно), управление по возмущению (включение в состав задания на момент не только выходного сигнала РС, но и производной заданной скорости), компенсация скольжения (другой вариант управления по возмущению, осуществляющий с целью стабилизации скорости увеличение выходной частоты ПЧ при росте момента на валу двигателя).

В продвинутых ПЧ нередко (в сервоприводах – как правило) имеется функция стабилизации момента. В этом режиме контур скорости отсутствует, а внешним контуром регулирования является контур момента (тока). Это обеспечивает поддержание момента на заданном уровне независимо от скорости вращения. Применяется такой способ регулирования в основном в перематывающих механизмах.

Регулирование положения также относится к стандартным функциям сервопреобразователей, в общепромышленных же применяется реже. Обычным является лишь позиционирование по конечным выключателям (одному или двум). Тем не менее, некоторые общепромышленные ПЧ имеют встроенные сервофункции, в частности, позиционирование с датчиком положения. Регулятор положения в этом случае обычно пропорциональный, широко применяется управление по возмущению («прямое» управление). Задание на перемещение может поступить извне как последовательность импульсов или сохранено в ПЧ в виде тахограммы движения.

Особо следует отметить ПЧ, в которых возможно построение систем регулирования самим пользователем. Для этого в них предусмотрен ряд блоков, имеющих входы и выходы и реализующих определенную математическую или логическую функцию над входными сигналами. Эти функциональные блоки могут соединяться между собой, управляющими входами и выходами ПЧ, входами системы управления преобразователем. Дискретные блоки (И, НЕ, ИЛИ, триггеры, счетчики, ключи и т.д.) обрабатывают логические сигналы, поступившие с дискретных входов ПЧ, а также события в самом преобразователе.

Другая категория блоков (фильтры, арифметические устройства, усилители, регуляторы, нелинейные элементы, интеграторы, задатчики интенсивности, компараторы) служит для обработки непрерывных сигналов, подаваемых извне на аналоговые входы, а также внутренних переменных электропривода (токов, напряжений, момента, скорости, магнитного потока, положения вала, управляющих сигналов). Подобная функция у различных производителей называется по-разному: адаптивное программирование (ABB), функциональные блоки (Lenze), свободно программируемые блоки (Siemens) и т.п.

### **Прикладные функции**

Прикладные функции служат для решения конкретных технологических задач, стоящих перед электроприводом. Перечислим лишь наиболее распространенные из них:

- выбор темпов разгона и торможения после получения команды на движение;
- переключение темпов в функции достигнутой скорости или по получении логической команды;
- формирование тахограмм с ограничением рывка;
- выбор способа остановки привода:
  - в рекуперативном режиме с заданным темпом (при наличии тормозного резистора или активного выпрямителя),
  - в режиме динамического торможения (чаще всего для аварийной остановки),
  - так называемое «торможение потоком», осуществляемое путем преднамеренного увеличения магнитного потока АД сверх номинального для роста потерь в нем в процессе торможения и предотвращения перенапряжения в звене постоянного тока при отсутствии там тормозного резистора (в отличие от динамического торможения возможен контроль темпа торможения).
  - на выбеге;
- фиксация вала двигателя подачей в обмотку статора постоянного тока;
- намагничивание асинхронного двигателя перед пуском (подача постоянного тока в обмотку статора предотвращает колебания момента при разгоне и повышает быстродействие);
- пропуск частот (предотвращение работы на частотах, вызывающих механический резонанс);
- позиционирование по конечным выключателям;
- предустановленные скорости (выбор заданных скоростей из заранее сохраненного списка с помощью внешних логических команд);
- управление электромагнитным тормозом;
- сон/пробуждение (при управлении насосами и компрессорами с резко переменным расходом позволяет временно останавливать привод при малом расходе с целью энергосбережения);
- подхват на ходу (плавный перезапуск вращающегося по инерции двигателя после кратковременного перерыва питания);

- переключение комплектов параметров (осуществляет автоматическое изменение настроек ПЧ при изменении условий его работы, в том числе при подключении другого двигателя);
- управление сетевым и выходным контакторами;
- шаговый режим (позволяет подавать команду на движение в ручном режиме при наладке технологической установки);
- ведомый/ведущий (обеспечивает равномерное распределение нагрузок между двумя двигателями с жестко соединенными валами или синхронное вращение нескольких приводов).

### **Защиты**

Преобразователь частоты обеспечивает защиту от аварийных режимов не только самого себя, но других элементов силовой цепи. В большинстве ПЧ предусмотрены следующие виды защит:

- от перегрева инвертора, двигателя, тормозного резистора и тормозного ключа (с помощью датчиков температуры или косвенная время-токовая);
- от перегрузки по току;
- от КЗ транзисторов и междуфазного КЗ на выходе ПЧ;
- от замыкания на землю;
- от чрезмерного повышения и понижения напряжения в звене постоянного тока;
- от выхода внутренних переменных (скорости, тока, момента, мощности) за установленные пределы;
- от затяжного перезапуска;
- от недогрузки двигателя (например, при обрыве ременной передачи);
- от блокировки вала двигателя;
- от обрыва аналогового задания;
- от отказа линии связи;
- отключение ПЧ при получении сигнала внешнего прерывания и т.п.

При срабатывании защиты индицируется код неисправности, облегчающий ее устранение. Возможно сохранение списка последних неисправностей, а также «аварийного следа» (значений основных переменных ПЧ на момент возникновения аварии).

Кроме того, предусмотрены меры, нередко предотвращающие возникновение аварий. Так, при приближении контролируемой переменной к аварийному порогу индицируется предупреждающее сообщение. Такого же рода сообщение выводится перед истечением срока службы охлаждающего вентилятора и силового конденсатора звена постоянного тока. Ряд функций (функции безопасности) вмешивается в процесс функционирования ПЧ, чтобы не допустить его отключение в результате срабатывания защиты:

- токоограничение (автоматическое снижение выходной частоты ПЧ или темпа разгона при приближении тока к уставке максимально-токовой защиты);
- поддержание напряжения в звене постоянного тока при кратковременном

исчезновении или чрезмерном снижении напряжения сети (временный перевод двигателя в режим рекуперации в ряде случаев дает возможность, если не предотвратить отключение, то хотя бы благополучно завершить технологическую операцию);

- стабилизация выходного напряжения при неноминальном напряжении в сети (способствует стабилизации момента двигателя и повышает устойчивость работы электропривода);
- адаптация темпа торможения (при отсутствии тормозного резистора снижается заданный пользователем темп до такого, при котором не наблюдается перенапряжение в звене постоянного тока);
- автоматическое снижение частоты модуляции при увеличении тока нагрузки или температуры инвертора;
- ограничение момента (через аналоговый или логический вход).

### **ПЧ как средство автоматизации**

Для решения задач автоматизации в современных ПЧ предусмотрено достаточное количество средств. Даже самые простые преобразователи имеют управляющие входы и выходы, через которые они обмениваются информацией с внешними средствами автоматизации (логическими контроллерами, промежуточными реле, контакторами, датчиками, другими ПЧ). Существуют три вида входов/выходов: аналоговые, дискретные (цифровые) и импульсные.

На аналоговый вход обычно поступает задание на выходную частоту (момент). В некоторых ПЧ имеется возможность выполнять с сигналами, поступившими на несколько аналоговых входов, различные математические операции (сложение, вычитание, умножение, деление). Аналоговые входы обычно можно приспособить к характеру источника сигнала: задать тип сигнала (токовый или сигнал напряжения, одно- или двухполярный), изменить коэффициент передачи входа, настроить параметры фильтра на входе. На аналоговые выходы выводятся сигналы, пропорциональные текущим значениям внутренних переменных привода (ток, напряжение, частота, скорость и т.п.) с целью их индикации или передачи другим устройствам. Количество аналоговых входов и выходов может достигать 3-4.

Дискретные входы бывают двух видов: логические и импульсные. Логические входы в большинстве случаев конфигурируемые. Конфигурирование входа (выбор функции входа) реализует определенную договоренность о том, как будет восприниматься преобразователем команда, поступившая на этот вход (например, логическая единица на каком-либо входе в зависимости от этой договоренности может быть понята как команда реверса, быстрой остановки, сброса ошибки или активизации ограничения момента). Количество логических входов у ПЧ различных типов колеблется от 3 до 12, количество функций таких входов – от десятка до полутора сотен. Помимо функции, для входа можно задать тип логики (положительная или отрицательная), величину временной задержки выполнения команды. В некоторых ПЧ логические входы допускают переконфигурирование в аналоговые входы или логические выходы. Импульсные входы используют как входы задания положения или сигналов об-

ратной связи от импульсных датчиков.

Дискретные выходы служат для индикации наступления какого-либо события (достижения заданной скорости, температуры, тока, состояния преобразователя и его отдельных составных частей, неисправности и т.д.). Чаще всего дискретные выходы используют для сигнализации состояния ПЧ и управления внешними устройствами (электромагнитный тормоз, сетевые и выходные контакторы). Выходным каскадом дискретного выхода может быть транзистор (логический выход) или электромеханическое реле (релейный выход). Чаще всего дискретные выходы переназначаются на различные функции (от нескольких до нескольких сот).

Импульсные входы используют, например, для ввода в ПЧ сигналов от инкрементальных датчиков положения или импульсных сигналов задания на положение (скорость). Через импульсные выходы могут быть выведены сигналы «эмуляции энкодера», содержащие информацию о положении вала двигателя в том же формате, что и выходные сигналы инкрементального датчика (используются для синхронизации движения нескольких приводов).

В большинство ПЧ (кроме самых простых) встроен регулятор технологического параметра (обычно пропорционально-интегро-дифференциальный). Регулятор может быть использован для регулирования давления в насосной магистрали, уровня воды в резервуаре, температуры охлаждаемого объекта, натяжения перематываемого материала, содержания влаги или газообразных примесей в системе вентиляции и т.п. Задание и сигнал обратной связи для регулятора поступают через входы ПЧ, а выходной сигнал регулятора служит заданием на выходную частоту преобразователя.

Некоторые ПЧ имеют встроенные логические контроллеры различной степени сложности для осуществления функций релейной автоматики. Простейшие из них предназначены для обработки логических сигналов с входов ПЧ или событий внутри него для выдачи на дискретные выходы. Более сложные способны реализовать программную последовательность действий (например, разгон, движение, замедление, реверс) с возможностью получения внешних команд для перехода в очередное состояние, программирования длительности отдельных состояний, задания количества повторений.

Для реализации более сложных алгоритмов предназначены платы (модули) встраиваемых логических контроллеров со своими входами и выходами, ПИД-регулятором, памятью, языками высокого уровня (стандарт МЭК) и средой программирования. Обычно предусмотрены встроенные коммуникационные протоколы. Подобные контроллеры имеют доступ ко всем входам/выходам ПЧ и дополнительных плат, внутренним переменным ПЧ. Программируются они либо с пульта ПЧ, либо с помощью персонального компьютера.

На базе таких контроллеров созданы также платы для конкретных прикладных задач, в которых перепрограммирование контроллера невозможно, а имеется лишь доступ к настроечным параметрам. Примерами таких прикладных задач могут быть:

- переключение нескольких насосов, работающих на общую магистраль (стабилизация давления, поочередный плавный разгон и остановка по ме-

- ре необходимости, обеспечение равной наработки);
- координация приводов горизонтального перемещения крана с целью устранения раскачивания груза при переменной высоте подвеса;
  - позиционирование;
  - управление лифтом, перематывающими механизмами, летучей пилой и т.д.

В ПЧ с достаточно большими вычислительными возможностями некоторые из таких функций могут быть реализованы без дополнительных аппаратных средств с использованием лишь программных опций.

В современных системах автоматизации широко используются коммуникационные сети. Их применение обеспечивает быстрый обмен информацией между контроллерами, исполнительными устройствами, датчиками. К одной сети могут быть одновременно подключены сотни устройств. В различных отраслях промышленности приняты различные протоколы обмена информацией. Большинство ПЧ имеют от одного до четырех встроенных протоколов и специальные порты для подключения к коммуникационной сети. Имеются также встраиваемые опциональные сетевые платы, предназначенные для работы с другими протоколами. По сети ПЧ может получать от логического контроллера верхнего уровня задающие сигналы и команды управления, значения настраиваемых параметров, а обратно отправлять информацию о своем текущем состоянии.

### **Диалоговые средства и настройка**

Программирование преобразователя частоты (т.е. приспособление его к конкретной прикладной задаче) производят путем изменения его настраиваемых параметров (таких, например, как частота коммутации, длительность разгона, номинальная частота питания двигателя, закон управления двигателем, назначение логического входа и т.п.). Каждый из таких параметров имеет имя, код и ряд допустимых значений, в том числе значение по умолчанию (заводскую настройку). Присвоение параметру нужного значения и будет содержанием программирования. Параметры для удобства доступа упорядочены в тематические меню и подменю (вложенные меню). Настройка может производиться как путем последовательного изменения значений параметров, так и путем загрузки в память ПЧ заранее заготовленного комплекта настроек (конфигурации). Количество настраиваемых параметров лежит в пределах от нескольких десятков у наиболее простых ПЧ до многих сотен в ПЧ с высокой функциональностью. Некоторые ПЧ снабжены специальной программой (мастер запуска), предлагающей пользователю подсказки в процессе начальных настроек.

Для облегчения процесса наладки служат так называемые макроконфигурации, содержащие настройки, типичные для конкретных технологических задач (например, для управления насосами и вентиляторами, грузоподъемными механизмами, применение ПИД-регулятора). Макроконфигурации отличаются друг от друга различными значениями по умолчанию наиболее важных параметров, назначениями управляющих входов/выходов. Существенно ускоряет процесс наладки и автонастройка, упоминавшаяся ранее. Если ПЧ поставляется

вместе с двигателем того же производителя (это характерно для сервоприводов и некоторых общепромышленных преобразователей), то предусмотрено такое удобство, как «электронная заводская табличка». После первого включения ПЧ двигатель либо распознается автоматически, либо его тип выбирается из соответствующего меню. После этого в память ПЧ автоматически загружаются параметры двигателя, используемые для расчета настроек регуляторов.

Обычно предусмотрено разграничение уровня доступа к параметрам. Это необходимо для предотвращения неквалифицированного или злонамеренного вмешательства в настройки (для этого вводятся пароли), а также для удобства пользователя (облегчается доступ к часто используемым параметрам и меню).

Диалог пользователя с ПЧ обеспечивается встроенным или съемным (выносным) пультом управления с клавиатурой и дисплеем (семисегментным или графическим), а также персональным компьютером с соответствующим программным обеспечением и кабелем связи с ПЧ. Эти средства позволяют:

- отобразить в режиме реального времени текущие переменные привода и его неисправности, состояние ПЧ;
- произвести настройку ПЧ;
- подать команды пуска, остановки, реверса, сброса ошибки.

Съемный пульт современных ПЧ имеет обычно графический дисплей, собственную память, позволяющую сохранить несколько комплектов настроек, возможность выбора языка общения (некоторые пульты русифицированы), встроенный help. С одного пульта можно загрузить настройки на несколько ПЧ (либо подключая пульт к различным ПЧ поочередно, либо с помощью коммуникационной сети).

Программное обеспечение, предназначенное для настройки ПЧ с помощью персонального компьютера, обычно позволяет работать со всеми ПЧ (нередко не только с ПЧ, но и другими устройствами) данного производителя. Преимуществами данного способа настройки являются возможность создания любого количества файлов конфигурации в офисе без подключения к ПЧ, получение осциллограмм внутренних переменных ПЧ в режиме реального времени, распечатка и экспорт списка настроек в другие приложения. Помимо настроечного программного обеспечения, предлагаются также программы для выбора ПЧ и расчета экономической эффективности их применения, гармонического состава токов, потребляемых ПЧ из сети.

Многие производители для быстрого копирования настроек в ПЧ предлагают специальные малогабаритные карты памяти (загрузчики). Некоторые из них благодаря наличию встроенного источника питания способны это делать без подключения последнего к сети.

### **Электромагнитная совместимость**

Поскольку ПЧ построен на ключевых полупроводниковых элементах, его свойства как потребителя и как источника электрической энергии, естественно, неидеальны. Хотя cosφ ПЧ с диодным входным выпрямителем близок к единице, форма потребляемого им тока далека от синусоидальной. Частично эту про-

блему можно решить, применяя индуктивные элементы в цепи питания ПЧ и в его звене постоянного тока. При больших мощностях экономически целесообразными могут оказаться многопульсные схемы выпрямления и активные выпрямители. В некоторых ПЧ для улучшения формы сетевого тока снижена емкость фильтра в звене постоянного тока. Однако рекомендовать такую меру можно только для приводов, работающих в условиях стабильного напряжения питания и малых перегрузок.

Выходной ток ПЧ с ШИМ имеет форму, близкую к синусоидальной и тем ближе к ней, чем больше частота модуляции. Однако применение в АИН быстродействующих IGBT-транзисторов имеет следствием другую проблему. Если кабель, соединяющий ПЧ и двигатель, достаточно длинный, в нем при высоких частотах модуляции могут возникать волновые процессы, возбуждаемые крутыми фронтами выходного напряжения ПЧ. Это приводит к появлению на обмотке статора перенапряжений, в 2 раза превосходящих напряжение на выходе ПЧ, повышенному электромагнитному шуму двигателя, снижению движущего момента, повышенному электромагнитному излучению кабеля, росту емкостных токов утечки в кабеле, а также токов, проходящих через подшипники двигателя (при мощностях, больших 75 кВт, наблюдается приваривание подшипников). Для подавления волновых процессов служат специальные фильтры, включаемые между ПЧ и кабелем либо на зажимах двигателя. В некоторых ПЧ предусмотрена модификация закона управления ключами, смягчающая эту проблему. С ростом мощности ПЧ допустимая длина кабеля возрастает и с учетом всех возможных мер может достигать 150 м для экранированного кабеля и 1000 м – для неэкранированного.

Защита ПЧ от наведенных электромагнитных помех осуществляется рядом конструктивных мероприятий (заземление, экранирование, отдельная прокладка силовых и контрольных кабелей). Те же меры, а также использование фильтров радиопомех на входе и выходе ПЧ позволяют подавить излучения, генерируемые самим ПЧ.

### **Конструкция, аппаратные опции и стоимость**

Охлаждение ПЧ мощностью до 1,1-2,2 кВт – обычно естественное с радиатором, более мощные имеют воздушное принудительное охлаждение (некоторые серии имеют только такой способ охлаждения). Имеются также конструктивные модификации, предназначенные для монтажа в герметизированный шкаф на общий охладитель. Есть примеры конструкций, позволяющих выносить силовую часть ПЧ за пределы шкафа для улучшения условий теплоотдачи. Принудительное жидкостное охлаждение низковольтных ПЧ применяется сравнительно редко.

ПЧ малой и средней мощности обычно изготавливаются в виде моноблока, предназначенного для монтажа на стену или в шкаф, более мощные имеют шкафную конструкцию для напольной установки. Большинство ПЧ допускают монтаж вплотную друг к другу. Могут поставляться комплекты ПЧ в шкафу с пускателем, предохранителями и автоматическим выключателем. Иногда входной выпрямитель и инвертор выполняются в виде отдельных конструктив-



ных модулей. При мощности до нескольких кВт возможно изготовление ПЧ, встроенных в двигатель (степень защиты до IP66). Это максимально упрощает монтаж, снимает проблему волновых процессов в длинном кабеле.

Степень защиты ПЧ от внешних воздействий определяется назначением преобразователя и лежит в пределах от IP20 до IP66.

Дополнительные элементы, расширяющие функциональные возможности, могут встраиваться в ПЧ или монтироваться отдельно. К числу встраиваемых опциональных устройств относятся:

- платы расширения входов/выходов с логическими, аналоговыми и импульсными входами и аналоговыми, логическими и релейными выходами;
- платы программируемого логического контроллера;
- платы прикладных задач;
- платы для подключения различного рода датчиков положения;
- сетевые платы для опциональных протоколов.

Аппаратные опции, монтируемые отдельно:

- тормозные резисторы и тормозные ключи (кроме ПЧ мощностью до нескольких десятков кВт, где они обычно встроены);
- реакторы переменного тока и дроссели постоянного тока;
- входные и выходные фильтры для обеспечения электромагнитной совместимости ПЧ с сетью и двигателем;
- фильтры для подавления генерируемых ПЧ радиопомех;
- активные выпрямители (рекуператоры).

Стоимость ПЧ с увеличением мощности закономерно возрастает, однако стоимость 1 кВт мощности снижается (рис. 6). Заключение ПЧ в оболочку IP54 увеличивает цену на 35-42%, использование реакторов переменного тока – на 13-50%, дросселя на выходе ПЧ – на 10-50% (меньшие значения соответствуют большей мощности).

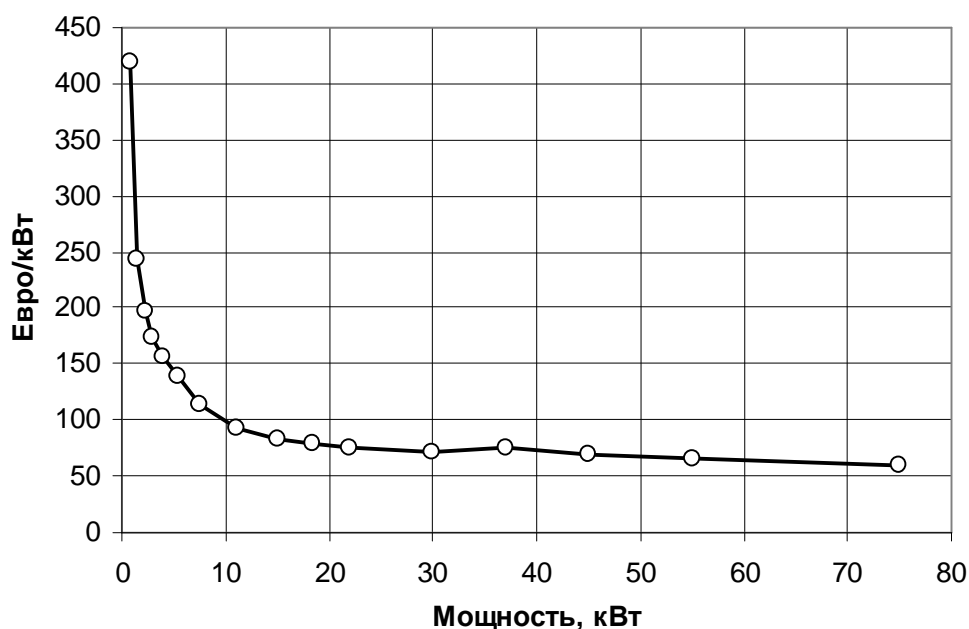


Рис. 6. Удельная стоимость (евро/кВт) ПЧ для механизмов с «переменным»

моментом (3×380 В, IP20) одного из западноевропейских производителей

## Выводы

Наличие на рынке большого количества производителей ПЧ и их конкуренция приводит к быстрому обновлению серий ПЧ, улучшению их качественных показателей (массогабаритных, регулировочных, энергетических), заимствованию новых функций и расширению функциональных возможностей, повышению удобства наладки и эксплуатации. О степени улучшения качественных показателей ПЧ можно судить на примере 4 поколений преобразователей с ШИМ мощностью до 15 кВт компании Schneider Electric, последовательно заменявших друг друга (рис. 7). Массогабаритные показатели улучшились практически вдвое, количество настраиваемых параметров – почти впятеро, возросло количество управляющих входов/выходов, заметно расширился диапазон выходной частоты и частоты модуляции.

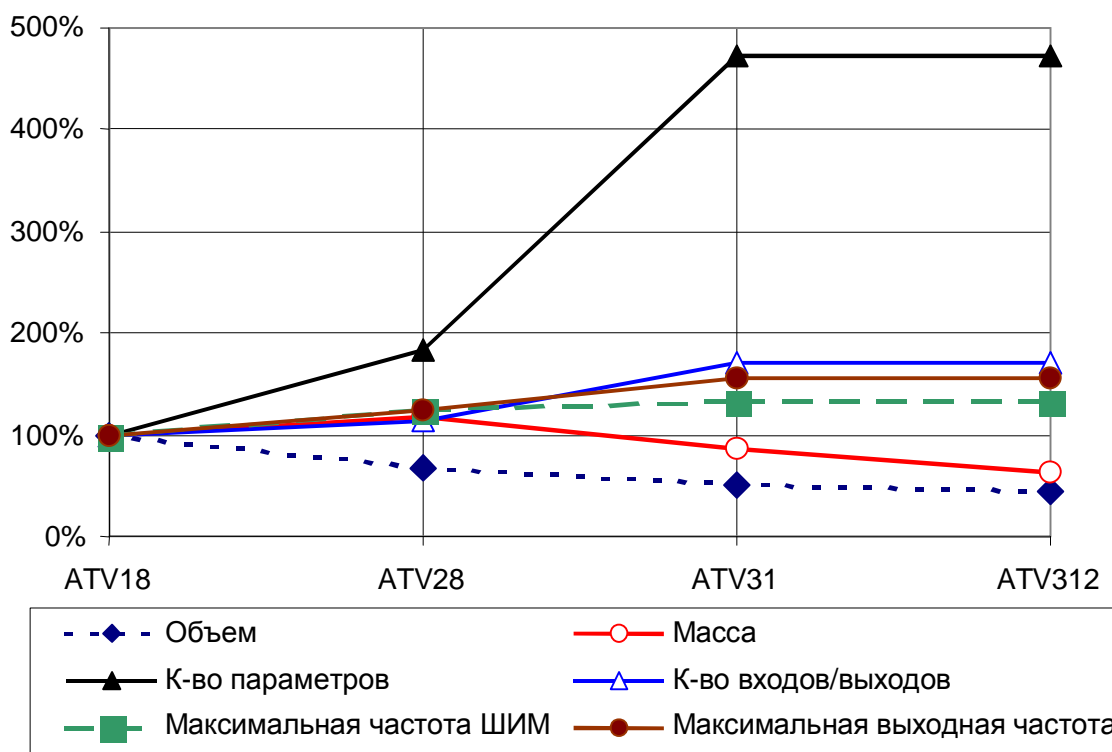


Рис. 7. Рост показателей ПЧ с ШИМ компании Schneider Electric (показатели ATV18 приняты за 100%)

Резко изменился характер труда наладчика (от паяльника, отвертки и осциллографа к ноутбуку и меню параметров, от индивидуальной настройки каждого преобразователя к копированию настроек). Значительная часть настроек может быть выполнена в офисе, еще до непосредственного контакта с преобразователем.

Основными тенденциями развития современных ПЧ являются:

- тенденция специализации (по характеру технологических задач, уровню функциональности, условиям эксплуатации);
- тенденция универсализации (расширение списка параметров и прикладных функций, опциональных аппаратных узлов и программных опций,

диапазона выходных частот, увеличение количества управляющих входов/выходов, применение для управления не только асинхронными, но и синхронными машинами);

- тенденция децентрализации и интеллектуализации (рост вычислительных и коммуникационных возможностей ПЧ, придание ему средств автоматизации технологических процессов, встраивание ПЧ в двигатель).

В настоящее время низковольтные ПЧ являются преобладающей разновидностью преобразователей энергии для электроприводов (от простых до высокотехнологичных), основным орудием энергосбережения средствами электропривода.

#### Список литературы

1. Altivar 71. Variable speed drives for synchronous and asynchronous motors Software V2.5: Programming manual. Schneider Electric. – 2008. – 290 p.
2. Руководство по проектированию FC 300. Документ MG.33.BA.50. Danfoss. – 2007. – 196 с.
3. Руководство по программированию привода VLT ® AQUA: Документ MG.20.O2.50. Danfoss. – 2007. – 338 с.
4. MICROMASTER 420: Руководство по эксплуатации 6SE6400-5AA00-0AP00. Издание A1. Siemens AG. – 2000. – 130 с.
5. Преобразователи частоты серии SJ 700: Краткое справочное руководство Manual No. NT204BX. Hitachi Industrial Equipment Systems Co., Ltd. – 2008. – 45 с.
6. SINAMICS S120 Drive Functions: Function Manual 07/2007 Edition, 6SL3097-2AB00-0BP4. Siemens. – 2007. – 560 p.
7. Преобразователь частоты FR-F 700EC: Руководство по эксплуатации № 159493, версия В. Mitsubishi Electric. – 2005. – 506 с.
8. Каталог ACS800. 3AFE 64589075 REV E RU. -М.: ООО АББ Индустри и Стройтехника. – 2004. – 40 с.
9. Преобразователи частоты серии 8200 Vector 0,25...90 кВт: Руководство по эксплуатации. -К.: СВ Альтера. – 2005. – 80 с.
10. VARISPEED F7. Преобразователь частоты для векторного управления: Руководство по эксплуатации YEG-TOR-S616-55.1-OY. Omron. – 2004. – 367 с.
11. Unidrive SP. Расширенное руководство пользователя 0471-0002-08. Control Techniques Drives Limited. – 2007. – 416 с.
12. Частотно-регулируемый привод переменного тока PowerFlex 700: Руководство пользователя 20B-UM001B-EN-P P/N 195670-P02 Allen-Bradley. – 2006. – 163 с.

*Рекомендовано до друку: профессором Ивановим О.Б.*