

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Приводится анализ реализации матричного регулятора скорости асинхронного двигателя. Произведен сравнительный анализ работы преобразователей частоты, указаны достоинства и недостатки непосредственных преобразователей частоты, автономных инверторов и матричных преобразователей.

В настоящее время в промышленных цехах идет широкое внедрение регулируемого электропривода переменного тока, что позволяет обеспечить повышение производительности и качество продукции, а также снизить затраты энергии на единицу выпускаемой продукции.

Металлургическая промышленность характеризуется высоким уровнем использования мощных широкорегулируемых электроприводов с большим числом включений в час, которые базируются сегодня на двигателях постоянного тока. Это главные привода обжимных станов, толстолистовых, крупносортовых и т.д. Однако высокая стоимость двигателей постоянного тока, ограниченная мощность и напряжение, наличие скользящего контакта – все это определило уже в 30-е года XX века начало исследований по созданию частотно-регулируемого электропривода переменного тока [1].

Во второй половине XX века началось широкое внедрение в промышленность полупроводниковых устройств, что дало возможность исключить электромашинные преобразователи, сохранив машины постоянного тока в качестве электродвигателей. Базой регулируемого электропривода стала система ТП-Д, что повысило к.п.д., быстродействие и производительность установок [2].

Управляемые вентили активизировали работы по созданию преобразователей частоты для регулирования скорости двигателей переменного тока. Развитие преобразователей велось в двух направлениях: непосредственные преобразователи частоты (НПЧ), и преобразователи частоты со звеном постоянного тока – автономные инверторы (АИ) [3].

Целью данной статьи является анализ основных типов преобразователей и их основных энергетических показателей.

Двигатели переменного тока устанавливаются на механизмах центробежного типа (дымососы, компрессоры, эксгаустеры и т.п.). Регулирование производительности выполняют шиберами и задвижками, что равносильно регулированию тока в электрической цепи добавочными сопротивлениями. К достоинствам электродвигателей переменного тока можно отнести то, что их стоимость меньше порядка в два раза за счет простоты конструкции и веса на единицу мощности. Отсутствуют скользящие контакты, нет ограничения по мощности, величина напряжения достигает 10 кВ. Существенный недостаток этих двигателей – отсутствие экономически оправдываемого регулируемого по частоте источника переменного тока. Электромашинные преобразователи частоты не решали этой проблемы, т.к. возрастала стоимость каскада электромашин для 4-кратного преобразования энергии, а потери в них составляли 30 ÷ 40 %. Развитие статических преобразователей постоянного и переменного тока тормозилось до 60-х годов отсутствием элементной базы. Появление ртутных выпрямителей в 50-х годах не повлияло кардинально на дальнейшее развитие статических источников постоянного тока. Только с появлением управляемых вентилей начались разработки преобразователей частоты для регулирования скорости двигателей переменного тока (НПЧ и АИ).

¹ПГТУ, канд. техн. наук

²ПГТУ, ст. преп.

³ПГТУ, ассистент

Номинальная мощность АИ существенно зависит от коэффициента сдвига нагрузки, в то время как у НПЧ номинальная мощность определяется полной мощностью. На приводах мощностью более 100 кВт при управлении от НПЧ к.п.д. возрастает на 2-3 % в сравнении с АИ.

Недостатком НПЧ является низкий коэффициент мощности на стороне питающей сети. Установка на стороне питания компенсирующих конденсаторов номинальной мощностью $0,5S_{2\text{ном}}$ обеспечивает коэффициент мощности выше, чем у автономных инверторов ($\cos \varphi_2 > 0.8$). При $\cos \varphi_2 > 0.9$ НПЧ по всем показателям превосходят автономные инверторы. Поэтому для приводов, требующих диапазоны регулируемой частоты от 0 до 20-25 Гц, следует применять НПЧ. На установках с низким коэффициентом мощности (0,3-0,4), при сбросах нагрузки целесообразным может быть применение АИ.

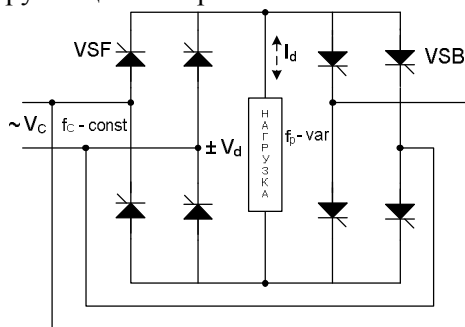


Рис. 1 – Схема силовой цепи двухполупериодного реверсивного ТП

Базовым элементом НПЧ является тиристорный реверсивный преобразователь, выходное напряжение которого зависит от величины и полярности сигнала управления.

Для пояснения принципа формирования регулируемого по частоте напряжения переменного тока, на рис.1 представлен однофазный двухполупериодный реверсивный тиристорный преобразователь (ТП), формирующий на нагрузке регулируемое по частоте однофазное напряжение U_d . Регулирование частоты f_p выходного напряжения выполняют изменением времени цикла T_p проводящего состояния выпрямителей VSF, VSB.

Это время определяет входной сигнал задания преобразователя частоты. Частота определяется соотношением числа полувольт питающего напряжения за цикл (T_c) к числу полувольт на выходе за цикл (T_p): $f_p = f_c \cdot T_c / T_p$. На волновых диаграммах (рис. 2б, 2в, 2д) представлено снижение частоты в 4 раза.

Качество работы преобразователей частоты (ПЧ) оценивается не только регулировочными возможностями, но и уровнем содержания в выходном напряжении основной гармоники ($\nu = 1$).

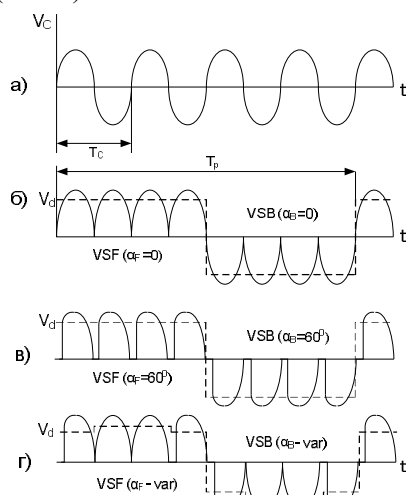


Рис. 2 – Волновые диаграммы:
а) входного напряжения $U_c(t)$;
б) выходного напряжения ПЧ $U_d(\alpha)$ при $\alpha = 0$; в) $U_d(t)$ при $\alpha_{F,B} = 60^\circ$; г) $U_d(t)$ при $\alpha_{F,B} - \text{var}$

Прямоугольная форма выходного напряжения (рис. 2б, 2в, пунктир) при разложении в ряд Фурье содержит кроме основной гармоники ($\nu = 1$) целый ряд низко- и высокочастотных гармоник. Последние подавляются параметрами фазных обмоток и не оказывают заметного влияния на потери в нагрузке, низкие требуют установки фильтров для их ограничения.

В цепях переменного тока при питании нагрузки индуктивного характера (двигатели переменного тока) можно допустить, что приложенное напряжение к нагрузке уравновешивается э.д.с. самоиндукции: $U_d \approx E = 4.44 \cdot w \cdot f_p \cdot \Phi$, где w – число витков обмоток, Φ – магнитный поток. С ростом f_p при постоянстве U_d снижается поток. В двигателях переменного тока это приводит к снижению перегрузочной способности привода.

Следовательно, при регулировании $\pm U_d$, изменяя амплитуду основной гармоники, обеспечивают требуемую перегрузочную способность привода (рис. 2в).

Чтобы повысить уровень содержания первой гармоники в выпрямленном напряжении ПЧ, закон управления выполняют синусоидальной или ступенчатой формы, что снижает уровень высших гармоник в преобразователе и двигателе (рис. 2г).

Управление выпрямительными группами может быть отдельным или совместным. В первом случае при нулевых значениях напряжения на выходе управляющие импульсы на тиристорах снимают. При подаче импульсов на одну из выпрямительных групп, вторая группа заблокирована, т.е. импульсы на нее не подают, чтобы исключить короткое замыкание в силовой цепи. В моменты переключения выпрямительных групп, с работающей снимают управляющие импульсы и, когда рабочий ток в ней спадает до нуля, подают импульсы на вторую группу. Схема управления содержит датчики наличия тока в каждой группе и программирующее устройство, задающее время бестоковой паузы при переключении выпрямительных групп. На время переключения влияют фазы сдвига тока нагрузки ϕ по отношению к напряжению, которое для синхронных двигателей заметно влияет на время переключения. При максимальных значениях времени переключения бестоковая пауза нарушает синусоидальную форму выходного напряжения.

Основным достоинством НПЧ с отдельным управлением выпрямительными группами является снижение потерь в силовой цепи, т.к. в работе НПЧ ток нагрузки протекает только через один из выпрямителей. В НПЧ с совместным управлением импульсы в процессе регулирования не снимают, выполняя соотношение углов управления $\alpha_F + \alpha_B = \pi$. На рис. 3 представлена схема замещения реверсивного преобразователя с совместным управлением [4].

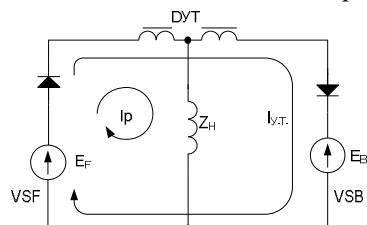


Рис. 3 – Схема замещения реверсивного преобразователя с совместным управлением

При формировании положительной полуволны выходного напряжения ($v = 1$) выпрямитель VSF открыт, его угол управления $\alpha_F < \pi/2$. Второй VSB переводят в инверторный режим работы $\alpha_B > \pi/2$. Его вентили открываются в зоне отрицательных полуволн питающего напряжения, т.е. встречно проводящему направлению вентилей VSB. При равенстве средневыпрямленных напряжений VSF и VSB рабочий ток I_p протекает только через VSF и нагрузку Z_H .

Равенство $|E_F| = |E_B|$ поддерживается во всех режимах работы преобразователя, что исключает к.з. в силовом контуре.

Несбалансированность мгновенных значений напряжений VSF и VSB приводит к возникновению в силовом контуре пульсирующего уравнивающего тока I_{YT} . Переменную составляющую I_{YT} ограничивают дросселями уравнивающего тока (ДУТ). Наибольшего значения I_{YT} достигает при нулевых значениях напряжений выпрямительных групп, то есть при $\alpha_F = \alpha_B = \pi/2$.

НПЧ с совместным управлением выпрямительными группами реализует выходное напряжение на нагрузке при более низком уровне высших гармоник в сравнении с отдельным управлением. Кроме того, упрощается управление при изменении направления тока. Существенным недостатком совместного управления является наличие в силовом контуре дросселей ДУТ, вес которых составляет до 70 % веса питающего трансформатора.

Поэтому в настоящее время ведутся разработки гибридных схем управления НПЧ, использующих положительные стороны отдельного и совместного принципов управления выпрямительными группами.

Матричный преобразователь (МП). МП был предложен в 80^е годы. Это был новый принцип регулирования скорости двигателей переменного тока – не регулированием скорости вращения поля статора, а толчковым подтормаживанием ротора до заданного значения скорости.

На рис.4 представлены основные элементы системы МП-Д: 1, 2 – асинхронный двигатель; 3, 4, 5 – фазные обмотки статора; 6 – матричный преобразователь; 7 – блок управления (UЗ - сигнал задания, о.с. ω – обратная отрицательная связь по скорости двигателя о.с. I – по току).

На вход МП поданы 3 фазы питающего напряжения. Начала и концы 3х обмоток статора подключены на выход МП.

Частота переключений, т.е. скорость M , определяется сигналом управления U_y , который подается на вход МП. Сигнал U_y является выходным сигналом с блока управления 7.

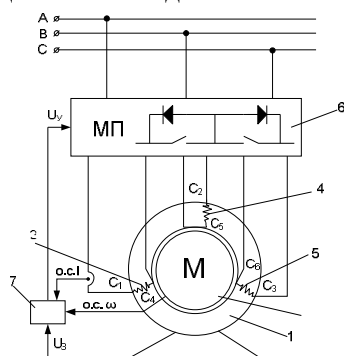


Рис. 4 – Силовая схема электропривода по системе матричный преобразователь-двигатель

Его величина определяется разностью сигнала задания U_3 и отрицательной ОС по скорости (о.с. ω).

В установившемся режиме работы привода разность входных сигналов блока управления (7) обеспечивает стабилизацию скорости двигателя. При отклонении скорости в моменты изменения питающего напряжения или нагрузки сигнал обратной связи по скорости нарушает эту разность, что приводит к изменению сигнала управления U_y , т.е. частоты переключений. Ограничение перегрузочной способности привода выполняет обратная отрицательная связь по току. В зоне превышения допустимой нагрузки о.с. по току формирует упорную часть механической характеристики привода, снижая скорость при упоре до нуля.

Основу МП составляют двунаправленные управляемые вентили (6) в количестве 21 штук, которые обеспечивают 3-хфазное питание статора (1) и прямое чередование фаз питающего напряжения на обмотках (3, 4, 5), выполняют подачу питания на начала обмоток статора: C_1, C_2, C_3 или на концы: C_4, C_5, C_6 . При прямом включении в сеть $A-C_1, B-C_2, C-C_3$ создается вращающееся магнитное поле, результирующий вектор которого определяется векторной суммой потоков 3-х обмоток (рис.5).

Волновая диаграмма потоков $\Phi(t)$ представлена на рис.5а. В момент времени t_1 : Φ_A – максимум Φ_m , $\Phi_B = \Phi_C = -0,5 \cdot \Phi_m$ (рис.5б). Результирующий поток $\Phi_p = 1,5 \cdot \Phi_m$ в процессе вращения остается постоянным. Через $1/3$ периода (t_2) результирующий поток повернется в сторону вращения фаз на 120° (рис.5в) со скоростью $\omega_0 \approx 2 \cdot \pi \cdot f$ (число пар полюсов $p=1$).

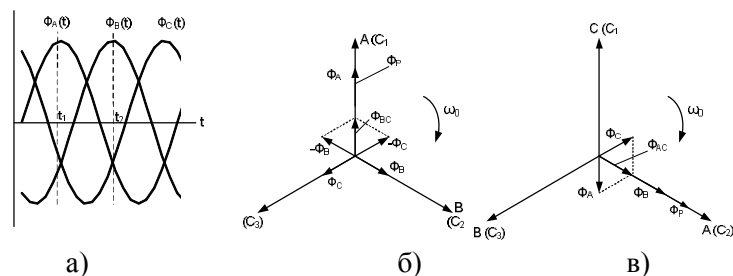


Рис.5 – Волновая и векторные диаграммы при смещении потока на 120°

Матричный метод регулирования скорости двигателя осуществляется не изменением частоты напряжения, подаваемого на обмотки статора, а подтормаживанием ротора при вращении.

Если в момент t_2 (рис.5а) одновременно с переключением фаз (А на В; В на С; С на А) изменить полярность на всех фазных обмотках, подав питание на их концы $A-C_5; B-C_6; C-C_4$, потоки во всех обмотках изменят свое направление на 180° (рис.6).

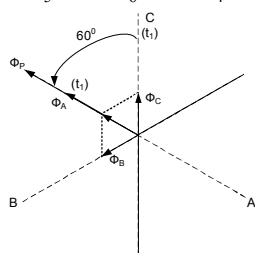


Рис. 6 – Векторная диаграмма при смещении потока на 60°

По отношению к исходному положению результирующий Φ_p сместится в сторону отставания на угол 60° . Смещение системы потоков статора создаст тормозной момент стабилизации, который пропорционален углу сдвига систем. Момент стабилизации максимален в момент переключения t_1 . По мере снижения угла рассогласования его величина снижается. Скорость поля статора постоянна, т.к. определяется частотой сети. Следовательно, действие стабилизирующего момента направлено на торможение ротора. При $t \geq t_1$ скорость вращения потока Φ_p становится ниже скорости вращения ротора. Возникает генераторный режим торможения, что снижает скорость ротора.

Матричный конвертор является одним из последних типов ПЧ, предложенный в начале 80-х годов. В отличие НПЧ и АИ, имеющих промежуточные выпрямители, МП обеспечивает прямое включение фазных обмоток двигателей переменного тока в рабочую сеть. Регулирование АД или СД реализуют изменением скорости вращения ротора от 0 до ω_0 . Коэффициент мощности привода определяет параметры и режим работы двигателя.

Выводы

1. При выборе преобразователей частоты для приводов, мощность которых сопоставима с мощностью системы электроснабжения, необходимо кроме общих требования (энергосбережение, к.п.д., стоимость эксплуатации и т.п.) учитывать электромагнитную совместимость электропривода с сетью. Набросы реактивной мощности и генерирование высших гармоник в питающую сеть приводят к колебаниям напряжения и к нарушению работы средств автоматики потребителей, питающихся от тех же шин.
2. АИ не оказывает заметного влияния на питающую сеть, формирует синусоидальное напряжение в широком диапазоне регулируемой частоты, а высокочастотные гармоники подавляются параметрами фазных обмоток.
3. Наличие трансформатора, двухступенчатое преобразование энергии и коммутационные потери снижают к.п.д. АИ на 3÷4 %, что ограничивает их применение приводами малой и средней мощности.
4. НПЧ имеет более высокий к.п.д. за счет одноступенчатого преобразования энергии и отсутствия коммутационных потерь. Недостатком является генерирование в питающую сеть реактивной мощности в зарегулированном режиме работы и широкий спектр высших гармоник. При установке ФКУ имеет высокие энергетические показатели во всем диапазоне регулирования напряжения. Регулируемая частота до 25 Гц.
5. Достоинством МП является широкий диапазон регулирования скорости – от 0 до 100%. В силовой цепи практически отсутствуют потери на коммутацию ключей и высшие гармоники. Существенный недостаток МП – зависимость параметров САР от величины момента инерции и статической нагрузки привода. Колебательный характер скорости в установившемся режиме работы может быть недопустим для ряда приводов, а регулирование в зоне малых скоростей – к росту тока статора до пускового значения.
6. Устранение указанных недостатков позволит МП занять лидирующее положение как регулятора скорости мощных приводов переменного тока.

Перечень ссылок

1. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода / М.Г. Чиликин, А.С. Сандлер. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов. – М.: Высш.шк., 2001. – 327 с.
3. Бедфорд Б. Теория автономных инверторов / Б. Бедфорд, Р. Хофт. – М.: Энергия, 1969. – 280 с.
4. Сабинин Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1985. – 128 с.

Рецензент: Ю.Л. Саенко
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 24.02.2009