

Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок —

эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях

Григорий Лазарев,
член-корр. Академии
электротехнических наук РФ

lazarev@vniie.ru

В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2020 года снижение энерго- и электроемкости экономики и повышение эффективности использования энергоносителей являются важнейшими стратегическими направлениями [1, 2]. Электроэнергетика является определяющей составляющей в структуре энергопотребления, которая вместе с теплоснабжением использует 70% топливно-энергетических ресурсов. Вместе с тем значительная часть энергоблоков ТЭС (более половины) эксплуатируется уже более 35 – 40 лет, их оборудование основательно устарело и нуждается в коренной реконструкции [3].

В настоящее время РАО «ЕЭС России» приступило к реализации долгосрочной инвестиционной программы, финансирование которой превысит 3 трлн руб. Главная цель — повышение эффективности выработки электроэнергии с применением современных энерго- и ресурсосберегающих технологий. До 2011 года в стране должно быть введено около 42 тыс. МВт новых генерирующих мощностей.

Такая финансовоёмкая программа формирует масштабные потребности электроэнергетики на все виды электротехнического оборудования: генераторы, трансформаторы, коммутационную аппаратуру и т. п. Определенное место в этом перечне занимает оборудование силовой электроники. Очевидно, что от того, какие технические решения, энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование для их реализации будут заложены в проекты строительства

и реконструкции энергоблоков ТЭС, зависит, какие энергообъекты будут эксплуатировать в электроэнергетической отрасли в XXI веке.

Переменные нагрузки ТЭС — основная причина неэкономичных режимов механизмов СН и потерь электроэнергии

Вследствие переменных режимов большинства энергоблоков ТЭС ухудшается надежность эксплуатации как основного тепломеханического оборудования, так и механизмов собственных нужд (СН) — многочисленных насосных и вентиляторных уста-

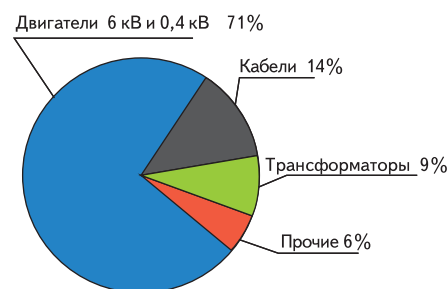


Рис. 1. Структура потерь в электрооборудовании

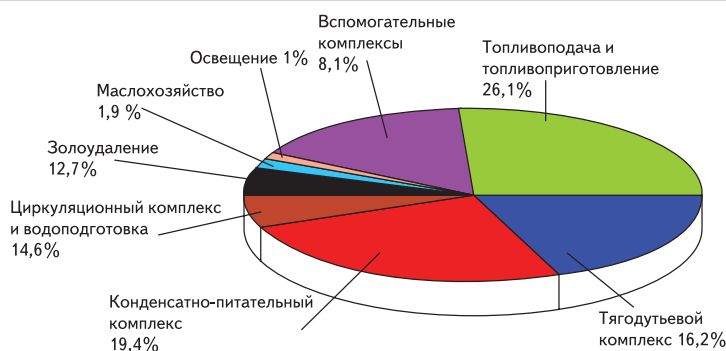


Рис. 2. Структура потерь по технологическим комплексам ТЭС

новок и их приводных асинхронных двигателей. Частые пуски и остановки энергоблоков, изменения их нагрузок сопровождаются дополнительными потерями из-за неоптимальных режимов работы основного оборудования и механизмов СН вследствие необходимости дросселирования теплоносителей (пара, воздуха, газов и т. д.)

При этом часы работы механизмов СН с максимальной нагрузкой на большинстве ТЭС не превышают в среднем, как правило, 20...25% общего времени их использования, что приводит к значительным (до 12...14%) потерям электроэнергии.

Примерную структуру потерь в электрооборудовании СН энергоблока 200 МВт иллюстрируют диаграммы рис. 1 и 2 [4].

Исключение дросселирования по тракту питательной воды и газозвоздушному тракту котлов и переход к регулированию производительности многочисленных насосных и вентиляторных установок ТЭС с помощью электроприводов с переменной частотой вращения позволяет добиться ощутимого энерго- и ресурсосбережения при приемлемой окупаемости затрат на энергосберегающее оборудование.

Частотное регулирование производительности механизмов СН, наряду с такими известными преимуществами, как снижение потребления электроэнергии и топлива, исключение гидро- и электродинамических ударов в пусковых режимах и при других переходных процессах, позволяет обеспечить новые, существенно важные в эксплуатации ТЭС возможности:

- Оптимизацию нагрева поверхности парогенераторов при разгрузках энергоблоков за счет уменьшения температурных перекозов, что не только повышает надежность их работы, но и существенно увеличивает ресурс.
- Экономичное прохождение энергоблоками режима «скользящих» параметров пара, что обеспечивает маневренность и высокую эффективность топливоиспользования в этом режиме.
- Дополнительное повышение мощности энергоблока в часы максимума нагрузок в энергосистеме.
- Обеспечение режима «мягкого» пуска, а также самозапуска (рестарта) электроприводов с механизмами СН при глубоких колебаниях или кратковременных исчезновениях с последующим восстановлением напряжения в системе электроснабжения собственных нужд.
- Снижение уровня выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (до 1,5%) и эмиссии CO₂ (до 1,5 тонн) на каждую сэкономленную тонну условного топлива за счет оптимизации процесса его сжигания.
- Повышение уровня автоматизации, совершенствование АСУ ТП энергоблоков.

Эффективное использование потенциала энергосбережения в СН ТЭС должно базироваться принципиально на двух направлениях:

- Замена механизмов СН и их приводных электродвигателей на новые энергоэкономичные с повышенным КПД для теплоэнергетических установок ТЭС, работающих большую часть времени в базовой части графика электрических нагрузок

энергообъединения. Такую замену принципиально следует проводить в первую очередь для изношенного оборудования, нормативный срок эксплуатации которого достиг предельно допустимого. Применение при этом частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) требует в каждом конкретном случае тщательного технико-экономического обоснования, которое, наряду с прочими условиями, должно учитывать, позволяет ли такое регулирование упростить технологический процесс, насколько увеличивается ресурсосбережение, не ухудшается ли прохождение режима самозапуска, можно ли увеличить мощность энергоблока и т. п.

- Сохранение в работе находящихся в эксплуатации электродвигателей СН, сопрягая их с преобразователями с регулируемой частотой, обеспечивающими оптимальное изменение производительности механизмов и значительную экономию электроэнергии в широком диапазоне нагрузок в маневренных режимах ТЭС.

Достижение высоких показателей экономичности возможно при массовом оснащении частотно-регулируемыми электроприводами таких наиболее энергоемких механизмов ТЭС, как дутьевые вентиляторы и дымососы, питательные электронасосы, циркуляционные, сетевые и подпиточные насосы.

Рис. 3 иллюстрирует интегральную оценку экономии электроэнергии (топлива) в зависимости от относительного ее использования регулируемыми механизмами в общем потреблении на собственные нужды ТЭС. При значении показателя $K = 0,7$ (это примерно соответствует оснащению регулируемым электроприводом указанных выше мощных механизмов) экономия электроэнергии может составить порядка 14%, а экономия удельного расхода топлива — 3 г/кВт/ч.

Масштабы возможной экономии электроэнергии на СН ТЭС можно показать на следующем примере. В настоящее время в электроэнергетике России работают более 50 газом-

зутных энергоблоков единичной мощностью по 300 МВт (суммарная мощность — 15 тыс. МВт) и 35 энергоблоков на газе единичной мощностью по 200 МВт (суммарная мощность — 7 тыс. МВт). При средневзвешенном годовом числе часов использования 5000 суммарной установленной мощности 22 тыс. МВт этих энергоблоков их годовая выработка составит 110 млрд кВт/ч. Средневзвешенный расход электроэнергии на СН на указанных 85 энергоблоках ~ 10% от вырабатываемой. При этом годовое потребление электроэнергии на СН составит 1,1 млрд кВт/ч. Прогнозируемая усредненная годовая экономия электроэнергии при установке ЧРП на основных механизмах СН энергоблоков ($K \approx 0,7$) составит 1,54 млрд кВт/ч, что сопоставимо с годовой выработкой электроэнергии энергоблока 200 МВт.

Частотно-регулируемый электропривод или гидромуфта

В последние несколько лет на ряде ТЭС получили применение гидромуфты для регулирования производительности насосных и вентиляторных установок. Гидромуфты являются механическими устройствами, устанавливаемыми между асинхронным двигателем и насосом или вентилятором. Они производятся несколькими фирмами, включая Voith Turbo, Nelson, Twin-Disc. На практике применяются обычно два типа гидромуфт:

- Турбомуфта одноступенчатой конструкции, которая может только понижать частоту вращения входного вала асинхронного двигателя. Муфты этого типа имеют весьма низкий КПД при регулировании частоты вращения вниз от номинальной.
- Многоступенчатые гидромуфты, включающие планетарный редуктор для увеличения и уменьшения частоты вращения выходного вала относительно входного, вращаемого асинхронным двигателем.

Плавное изменение частоты вращения в турбомуфте достигается изменением объема масла, поступающего от маслонасоса. Когда муфта полностью заполнена маслом, ее входной вал вращается с частотой, близкой к частоте вращения входного вала с небольшим скольжением и высоким КПД передачи. Чтобы уменьшить частоту вращения вала, необходимо удалить из гидромуфты масло. Когда масло удалено, передача энергии, обеспечивающей изменение момента на валу, снижается, растет скольжение, и частота вращения выходного вала гидромуфты падает.

С ростом скольжения при работе с низкими частотами вращения появляются большие потери энергии, связанные с ее отбором постоянно циркулирующей водой, охлаждающей гидромуфту. КПД турбомуфты со снижением частоты вращения падает, поэтому ее применение целесообразно при небольшом (10...15%) диапазоне регулирования частоты вращения вниз от номинальной. Турбомуфты одноступенчатой конструкции имеют невысокое быстродействие в диапазоне регулирования (2...4 мин), определяемое временем, требуемым для заполнения муфты маслом и его откачкой.

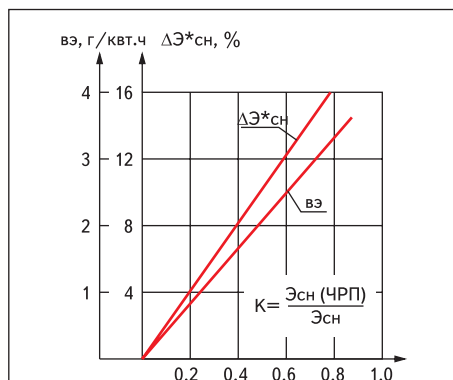


Рис. 3. Экономия электроэнергии (топлива) в зависимости от относительного потребления регулируемыми механизмами собственных нужд ТЭС: $вэ$ — экономия удельного расхода топлива; $\Delta Э^*_{сн}$ — экономия электроэнергии на собственные нужды; $Э_{сн(ЧРП)}$ — электроэнергия, потребляемая механизмами собственных нужд, оснащенными ЧРП; $Э_{сн}$ — электроэнергия, потребляемая на собственные нужды

Многоступенчатые муфты с переменной частотой вращения значительно сложнее турбомуфт, допускают более расширенный диапазон регулирования, однако имеют более высокую стоимость. За счет применения планетарной передачи выходная частота вращения выше входной. При этом основная часть мощности передается с небольшими потерями, что обеспечивает в диапазоне частоты вращения турбомеханизмов (вентиляторов, насосов) от 90 до 100% номинальный КПД примерно 94%. При дальнейшем снижении частоты вращения КПД уменьшается, но за счет многоступенчатости турборедукторная гидромуфта может регулировать частоту вращения в более широком диапазоне — от 40 до 100% номинальной.

Типичная гидравлическая муфта снабжается электротехническим и электронным оборудованием, включающим электрогидравлическую следящую систему для перемещения трубки, регулирующей изменение масла, с сервоусилителем и датчиком положения, электрогидравлическую следящую систему для поворота направляющих лопаток преобразователя момента с сервоусилителем и датчиком положения, двигатель переменного тока дополнительного насоса смазки, датчики (вибрации, уровня, давления, температуры и т. п.), нагреватель масла и т. д. Гидромуфты снабжаются также системой водяного охлаждения, причем при большой мощности требуют значительного расхода воды.

Для уменьшения токов при пуске насосных и вентиляторных установок многоступенчатые планетарные гидромуфты с расширенным диапазоном регулирования снабжаются дополнительными устройствами, устанавливаемыми на входном валу, еще более их усложняющими и удорожающими.

В частотно-регулируемом асинхронном электроприводе для управления частотой вращения электродвигателя применяют полупроводниковые преобразователи с регулируемой выходной частотой (ПЧ). Это позволяет изменять частоту вращения ротора (вала) двигателя пропорционально частоте и амплитуде подводимого к статору напряжения. Частотное управление является наиболее экономичным способом регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, так как обеспечивает плавный пуск

с током, близким к номинальному току двигателя, и его работу во всем диапазоне регулирования при малой величине скольжения ротора (с малыми потерями скольжения), сохраняет его высокий КПД, хорошую жесткость механических характеристик и возможность работы в двигательном и генераторном режимах.

Сопоставляя электрическое частотное регулирование с механическим регулированием гидромуфтой можно отметить следующее [5, 6]:

- Применение гидромуфты не уменьшает 6–7-кратный ток при пуске электродвигателя. Нагрев и значительные электродинамические воздействия на статор разрушают изоляцию и сокращают ресурс двигателя. Применение более сложных гидромуфт с облегченным пуском позволяет снизить продолжительность пуска, но не уменьшает величину пускового тока.
- При пуске от ПЧ пусковой ток, как правило, не превосходит номинальный ток двигателя. Это в принципе исключает дополнительный нагрев и разрушающие воздействия на изоляцию статора, не ограничивает количество пусков и продлевает ресурс двигателя.
- Гидромуфта обеспечивает регулирование только одного двигателя, в то время как ПЧ позволяет осуществить групповое управление несколькими электроприводами насосов. При этом в группе, например, из трех-четырех насосов, работающих параллельно, один (или два) работают с постоянной частотой вращения, а частоту других необходимо регулировать по условиям технологического процесса. Три или четыре насосных агрегата могут совместно использовать один или два ПЧ. Применение электрического частотного регулирования в этом случае обеспечивает значительную экономию затрат на оборудование и его установку.
- Применение ПЧ повышает надежность работы технологической схемы. Во-первых, двигатель может быть включен по схеме «электрического байпаса», позволяющей в случае отказа ПЧ переключить двигатель на сеть электроснабжения байпасным контактором. ПЧ может быть отремонтирован (среднее время ремонта 1 - 2 часа) и быстро введен в работу. Поэтому его отказ не приведет к нарушению технологического процесса в отличие от отказа гидромуфты.

Во-вторых, если ЧРП по условиям технологического процесса должен длительно работать с номинальной частотой вращения, то с помощью «синхронного» байпаса электродвигатель может быть переключен на сеть в режиме точной автоматической синхронизации (без бросков тока и провалов напряжения). При этом исключаются дополнительные потери в ПЧ в этом режиме. При необходимости регулирования частоты вращения электродвигателя он легко может быть отключен от сети и переключен на ПЧ. С гидромуфтой этот режим в принципе не реализуем.

- Эффективность частотно-регулируемого электропривода, как видно из рис. 4 и 5, существенно выше по сравнению с гидромуфтой независимо от диапазона частоты вращения электропривода.

На рис. 4 сравниваются зависимости КПД для трех типов гидромуфт фирмы Voith и преобразователя частоты при переменных нагрузках, а на рис. 5 — при различных частотах вращения [5].

При снижении частоты вращения ниже 80% КПД гидромуфты уменьшается очень быстро, падает ее энергоэффективность. Поэтому применение гидромуфт для регулирования механизмов СН на маневренных ТЭС вряд ли целесообразно как по техническим, так и по экономическим соображениям.

Схемы электрического регулирования частоты вращения асинхронных двигателей

Мощные механизмы СН на ТЭС обусловили применение высоковольтных асинхронных электродвигателей. Шкала их мощностей 250 – 5000 кВт, напряжение 6000 В [7].

Наибольшее применение для широкого диапазона регулирования частоты вращения асинхронных двигателей получили двухзвенные ПЧ, которые преобразуют электроэнергию питающей сети в электроэнергию с требуемыми значениями напряжения, тока и частоты в два этапа [8]. На первом с помощью выпрямителя производится преобразование тока и напряжения сети с частотой 50 Гц в постоянные ток и напряжение. На втором этапе постоянные ток и напряжение преобразуются в переменные, но уже

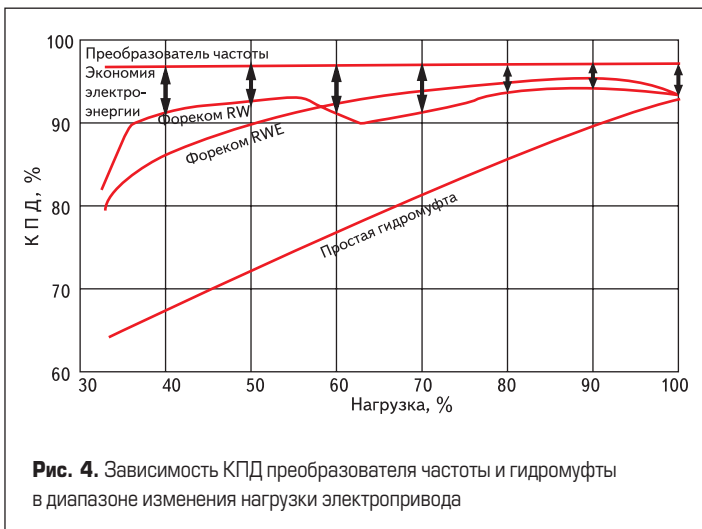


Рис. 4. Зависимость КПД преобразователя частоты и гидромуфты в диапазоне изменения нагрузки электропривода

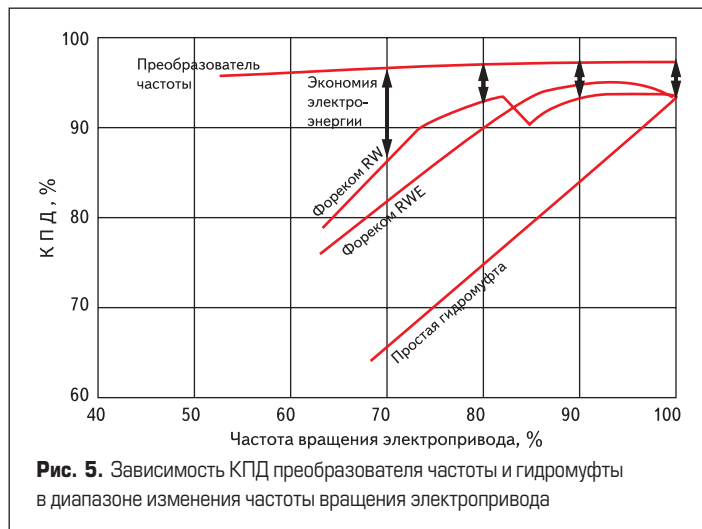


Рис. 5. Зависимость КПД преобразователя частоты и гидромуфты в диапазоне изменения частоты вращения электропривода

с новыми значениями тока, напряжения и частоты, требуемыми для обеспечения желаемого режима работы электродвигателя. Это преобразование осуществляется специальными устройствами — автономными инверторами. Автономным инвертор назван потому, что его работа не связана непосредственно с питающей сетью. Несмотря на кажущуюся громоздкость такого метода преобразования, КПД двухзвенных ПЧ оказывается весьма высоким — 96,5–98,5%. Это обусловлено эффективностью применяемых силовых полупроводниковых приборов в ключевом режиме работы.

Если автономный инвертор получает питание от источника напряжения, то есть от источника с малым внутренним сопротивлением (выпрямитель с емкостным фильтром), то на его выходе при переключении силовых полупроводниковых «ключей» может быть получено переменное напряжение в форме последовательности разнополярных прямоугольных импульсов. Первая гармоника такой последовательности должна соответствовать требуемому значению выходного напряжения. В этом случае для нагрузки — асинхронного электродвигателя — инвертор также является источником с малым внутренним сопротивлением, то есть *источником напряжения*. Такой инвертор называется автономным инвертором напряжения (АИН).

Если инвертор получает питание от источника с большим внутренним сопротивлением — источника тока, например сетевого выпрямителя с индуктивным фильтром (ток в индуктивности фильтра не может изменяться скачком), то при переключении «ключей» на выходе инвертора может быть сформирован переменный ток в виде последовательности разнополярных прямоугольных импульсов тока. Первая гармоника такой последовательности должна соответствовать требуемому значению выходного тока. В этом случае для нагрузки инвертор является источником с большим внутренним сопротивлением, то есть *источником тока*. Такой инвертор называется автономным инвертором тока (АИТ).

В отечественной и зарубежной практике применение получили три варианта сопряжения преобразователей частоты с высоковольтными асинхронными двигателями (рис. 6 и 7):

- с преобразователем частоты, подключенным непосредственно к статору высоковольтного двигателя (рис. 6);
- с низковольтным преобразователем частоты и двумя трансформаторами — на входе и выходе преобразователя — для согласования с напряжениями сети и высоковольтного асинхронного двигателя (рис. 7а);
- с заменой высоковольтного двигателя на стандартный низковольтный с соответствующим преобразователем частоты и входным согласующим трансформатором для подключения преобразователя к сети (рис. 7б).

Область рационального применения схем рис. 7 ограничена мощностью электропривода: двухтрансформаторная с низковольтным ПЧ — диапазоном порядка 500–1250 кВт, однотрансформаторная с заменой высоковольтного электродвигателя низковольтным — диапазоном 250–500 кВт.

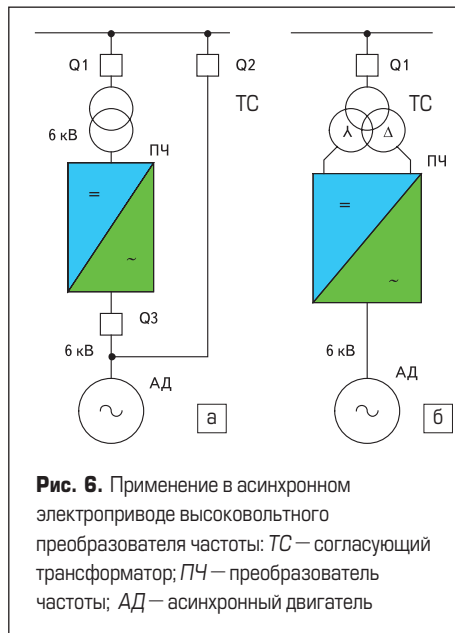


Рис. 6. Применение в асинхронном электроприводе высоковольтного преобразователя частоты: ТС — согласующий трансформатор; ПЧ — преобразователь частоты; АД — асинхронный двигатель

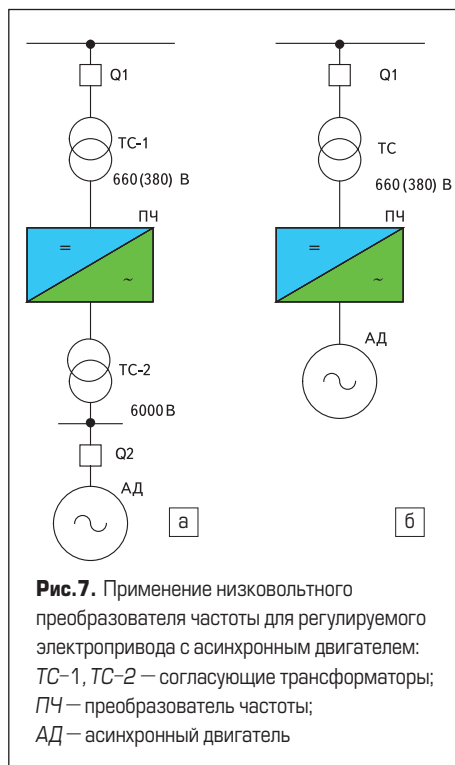


Рис. 7. Применение низковольтного преобразователя частоты для регулируемого электропривода с асинхронным двигателем: ТС-1, ТС-2 — согласующие трансформаторы; ПЧ — преобразователь частоты; АД — асинхронный двигатель

Интенсивное развитие частотно-регулируемого электропривода стало возможным благодаря принципиально новым достижениям в силовой и информационной электронике. Появление силовых полупроводниковых приборов с новыми свойствами и характеристиками позволило осуществлять преобразование электрической энергии в формах, наиболее удобных для ее электромеханического преобразования, что открыло широкие возможности для создания технически совершенных регулируемых электроприводов. А использование достижений микропроцессорной и компьютерной техники принципиально изменило элементную базу и функциональные возможности систем управления электроприводами.

Хотя круг рациональных технических решений и схем высоковольтных ПЧ с автономными инверторами тока и напряжения в целом определен, однако процесс их совершенствования непрерывно продолжается. Существ-

венное влияние на этот процесс оказывает появление на рынке новых силовых электронных компонентов. Применение компьютерного управления и микропроцессорных контроллеров позволяет формировать новые потребительские характеристики и «интеллект» частотно-регулируемого электропривода.

Можно выделить следующие основные тенденции общего подхода к решению задач создания высоковольтных ПЧ для регулируемого электропривода [9, 10]:

1. Тип силового полупроводникового прибора (ключа) оказывает существенное влияние на топологию схемы автономного инвертора и высоковольтного ПЧ в целом. По мнению некоторых фирм-производителей высоковольтных ПЧ (по зарубежной терминологии Medium Voltage) рациональнее всего использовать высоковольтные силовые ключи — тиристоры SCR, GTO, IGCT, SGCT и биполярные транзисторы — IGBT-модули. Применение таких ключей при определенной простоте топологии схемы преобразователей обуславливает (в высоковольтном исполнении) необходимость последовательного включения единичных ключей в так называемый «высоковольтный вентиль». В то же время ряд производителей высоковольтных ПЧ, считая, что основными недостатками преобразователей, построенных на высоковольтных вентилях, являются их повышенная стоимость, пониженный КПД и сложность обслуживания, предлагают использовать низковольтные ключи, что влечет за собой переход к многоуровневым технологиям и усложнению топологии схемы ПЧ и алгоритмов управления, что компенсируется их высокой технической и экономической эффективностью [11]. Очевидно, что оптимальное преобразование электрической энергии в ПЧ может быть обеспечено при применении силовых полупроводниковых приборов, обладающих в максимальной степени свойствами «идеального полупроводникового ключа». Такой ключ должен иметь следующие основные характеристики:
 - большой коммутируемый ток;
 - достаточно высокое напряжение;
 - быстрое переключение (короткое время задержки на включение и выключение, малое время фронтов при коммутации, малое время включения и выключения);
 - малые потери (статические и динамические);
 - высокую частоту (быстрое переключение, низкие динамические потери);
 - высокую надежность (низкая вероятность отказа, высокая энергетическая и тепловая стойкость, высокая коммутационная способность, высокая электродинамическая стойкость);
 - компактную конструкцию.
2. Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) ПЧ с асинхронными электродвигателями и системой электроснабжения. При оценке эффективности топологии автономного инвертора одним из важных критериев является возможность его сопряжения со стандартными высоковольтными асинхрон-

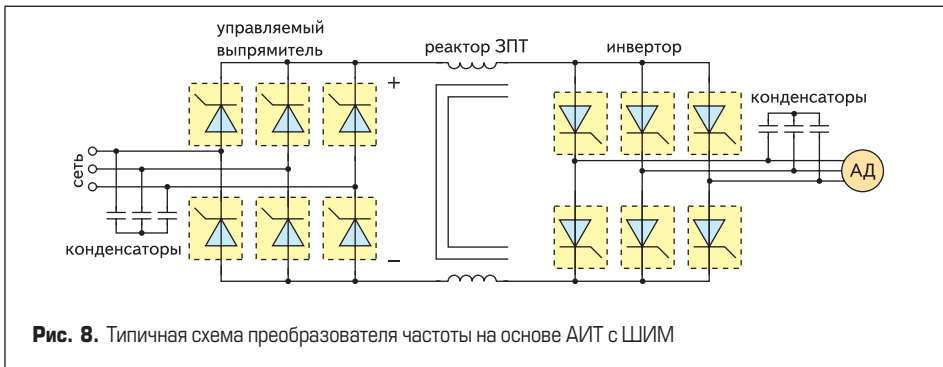


Рис. 8. Типичная схема преобразователя частоты на основе АИТ с ШИМ

ными двигателями, так как инвертор, являясь источником высших гармоник, оказывает влияние как на потери в двигателе и его допустимую нагрузку, так и на изоляцию статора. Это обстоятельство является особенно важным, и его нужно учитывать при выборе типа ПЧ для стандартных высоковольтных асинхронных двигателей, имеющих ограниченные запасы изоляционной прочности [12].

Применение модуляционных методов управления силовыми электронными ключами и многоуровневых схем инверторов позволяет эффективно решить задачу ЭМС высоковольтного ПЧ с асинхронным двигателем. Ряд фирм-производителей для улучшения формы выходного напряжения устанавливают на выходе ПЧ емкостные или индуктивно-емкостные (синусоидальные) фильтры, что повышает стоимость преобразователя. Без выходных фильтров ЭМС обеспечивается в многоуровневых схемах.

ЭМС высоковольтных ПЧ с сетью электропитания обеспечивается либо традиционными способами — такими как увеличение эквивалентной фазности (пульсности) сетевого выпрямителя, либо искусственным повышением мощности короткого замыкания в точке присоединения ПЧ. В большинстве случаев фирмы применяют 12- или 18-пульсные сетевые выпрямители на диодах или SCR-тиристорах, что позволяет ограничить в спектре высших гармоник 5-ю и 7-ю либо также 11-ю и 13-ю гармоники [12]. Применение 24-пульсных схем выпрямления обычно является опцией.

При сопряжении высоковольтных преобразователей частоты со «слабыми» сетями электропитания, в которых соотношение $S_{КЗсети}/S_{преобраз} < 30...35$, сетевой выпрямитель выполняется, как правило, в виде «активного буфера» (Aktiv Front End), представляющего собой малоискажающий сеть электропитания управляемый выпрямитель на силовых

ключах с ШИМ. Потребление таким выпрямителем из сети практически активного тока квазисинусоидальной формы с низким содержанием высших гармоник полностью решает задачу обеспечения требуемого значения коэффициента несинусоидальности формы напряжения, нормируемого стандартом на качество электроэнергии.

3. Совершенствование функций микропроцессорной системы управления:

- автоматический перезапуск (рестарт) ЧРП при восстановлении напряжения после его глубокого снижения или перерыва электроснабжения с быстрым поиском и определением текущей частоты вращения выбегающего электропривода;
- подхват преобразователем частоты вращения электродвигателя, что необходимо в системе группового управления несколькими параллельно работающими электродвигателями при отключении одного (любого) из них, работающего с постоянной номинальной частотой вращения, от сети электропитания и переводе его в режим работы с регулируемой частотой вращения;
- режим синхронного байпаса, обеспечивающего переключение электродвигателя на сеть в режиме точной автоматической синхронизации.

4. Разветвленная система диагностики и защит ЧРП.

5. Коммуникации, возможность полной интеграции в АСУ ТП.

Типы преобразователей частоты

Подход производителей высоковольтных ПЧ для асинхронных ЧРП можно свести к следующим принципиальным решениям:

- выполнение АИТ по мостовой схеме на SCR-тиристорах (включаемых по управлению и выключаемых с помощью конденсаторов);

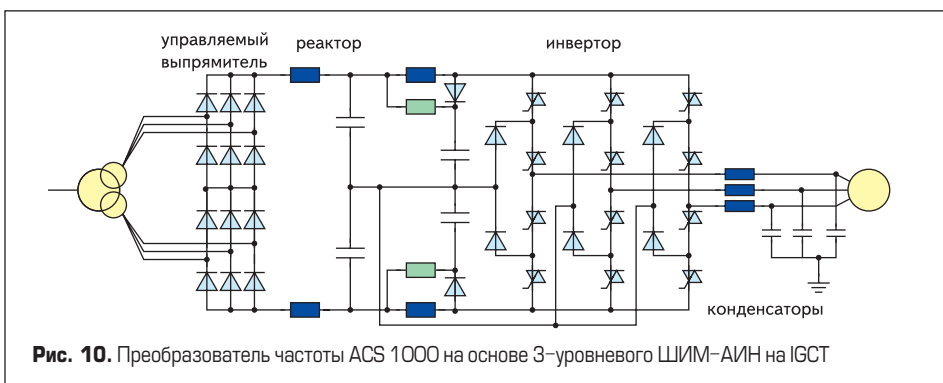


Рис. 10. Преобразователь частоты ACS 1000 на основе 3-уровневого ШИМ-АИН на IGBT

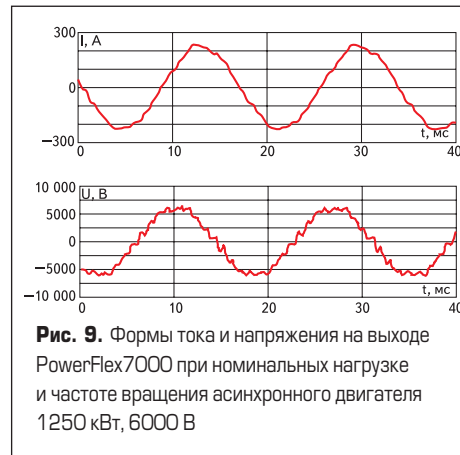


Рис. 9. Формы тока и напряжения на выходе PowerFlex7000 при номинальных нагрузке и частоте вращения асинхронного двигателя 1250 кВт, 6000 В

- выполнение АИТ на полностью управляемых (включаемых и выключаемых по управлению) симметричных тиристорах (GTO, SGCT);
- выполнение АИН с тремя уровнями напряжения (3-level) и коммутацией в «звезду» с фиксированной нулевой точкой или фиксированной нейтралью (Neutral-Point Clamped — NPC));
- выполнение АИН с четырьмя уровнями напряжения (4-level);
- выполнение АИН многоуровневым (Multi-level).

Для регулирования асинхронных двигателей с напряжением статора 6 кВ широкое распространение получили высоковольтные ПЧ с ШИМ-АИТ на основе симметричных GTO и SGCT-тиристоров, преимущественно производимые с 1992 г. фирмой Rockwell Automation (Allen-Bradley), а также с ШИМ-АИН по многоуровневой топологии на основе асимметричных коммутационных тиристоров с интегрированным драйвером (IGCT) и IGBT-модулей.

На рис. 8 приведена упрощенная схема ПЧ PowerFlex7000 на основе АИТ с ШИМ. Другие модификации ПЧ отличаются только схемой управляемого выпрямителя. Применение широтно-импульсной модуляции позволило получить форму инвертируемых тока и напряжения, близкую к синусоидальной, поскольку конденсаторный фильтр на выходе инвертора, поглощая высокочастотные гармоники, обеспечивает формирование в двигателе квазисинусоидальных тока и напряжения.

Осциллограмма на рис. 9 иллюстрирует формы тока и напряжения на выходе АИТ

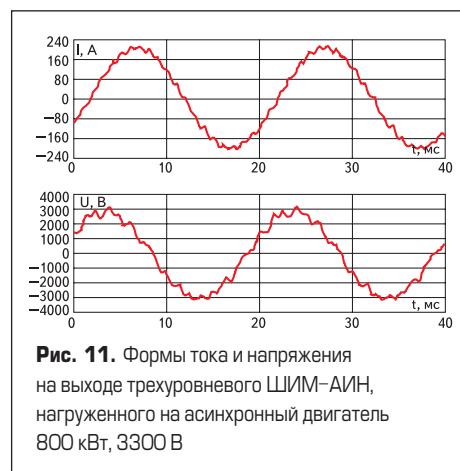


Рис. 11. Формы тока и напряжения на выходе трехуровневого ШИМ-АИН, нагруженного на асинхронный двигатель 800 кВт, 3300 В

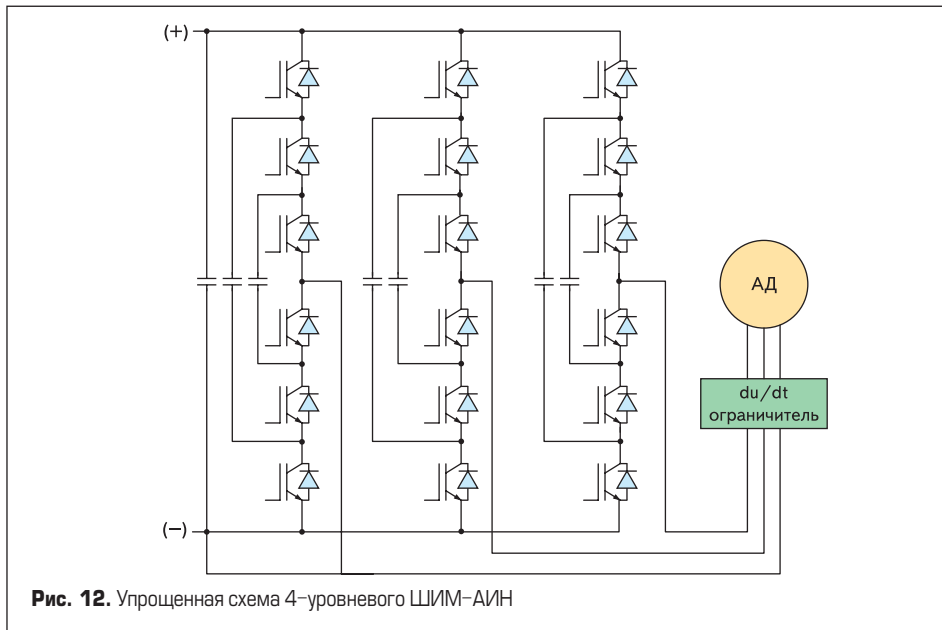


Рис. 12. Упрощенная схема 4-уровневого ШИМ-АИН

преобразователя PowerFlex 7000 при работе со стандартным асинхронным двигателем российского производства.

Эволюция топологии многоуровневых схем начиналась со схемы 3-уровневого ШИМ-АИН. Особенность такого АИН — формирование двуполярного выходного напряжения в виде прямоугольной «решетки» импульсов высокой крутизны, определяемой частотой переключения полупроводниковых приборов (IGCT, IGBT). Поэтому все автономные инверторы напряжения по NPC-топологии обязательно снабжаются включаемым на выходе синусоидальным фильтром во избежание повреждения изоляции статора асинхронного двигателя импульсами напряжения с высоким значением du/dt (скорости нарастания). 3-уровневые ПЧ ACS1000 напряжением до 4160 В на IGCT производит фирма ABB. По такой же топологии фирма Siemens выпускает ПЧ серий SimovertMV, а также Sinamics GM 150 и Sinamics SM 150 с применением IGCT и IGBT. Для согласования выходного напряжения ПЧ (оно не выше 4160 В) с напряжением двигателя 6 кВ и фильтрации высших гармоник в выходном напряжении на выходе ПЧ устанавливают синусоидальный фильтр,

состоящий из конденсаторной батареи и согласующего трансформатора (или автотрансформатора).

На рис. 10 показана в качестве примере схема ПЧ ACS 1000, а на рис. 11 формы тока и напряжения на статоре асинхронного двигателя 800 кВт, 3300 В, подключенного к этому ПЧ.

Следующим этапом была разработка фирмами Alstom и GE ШИМ-АИН с четырехуровневой формой выходного напряжения, показанного на принципиальной схеме рис. 12.

Как видно из осциллограмм на рис. 13, форма выходного тока практически синусоидальная, а выходное напряжение за счет большого количества ступенек имеет форму, близкую к синусоиде. Как правило, установка фильтра на выходе такого ПЧ необязательна, хотя фирмы рекомендуют в ряде случаев устанавливать облегченный синусоидальный фильтр.

Многоуровневые схемы ШИМ-АИН (топология Multi-level) стали следующим шагом развития технологии высоковольтных ПЧ, что позволило при наращивании их мощности одновременно снизить потери. Пионером в освоении такой топологии ПЧ была фирма Robicon. ПЧ с подобными АИН в различных модификациях для асинхронного электропри-

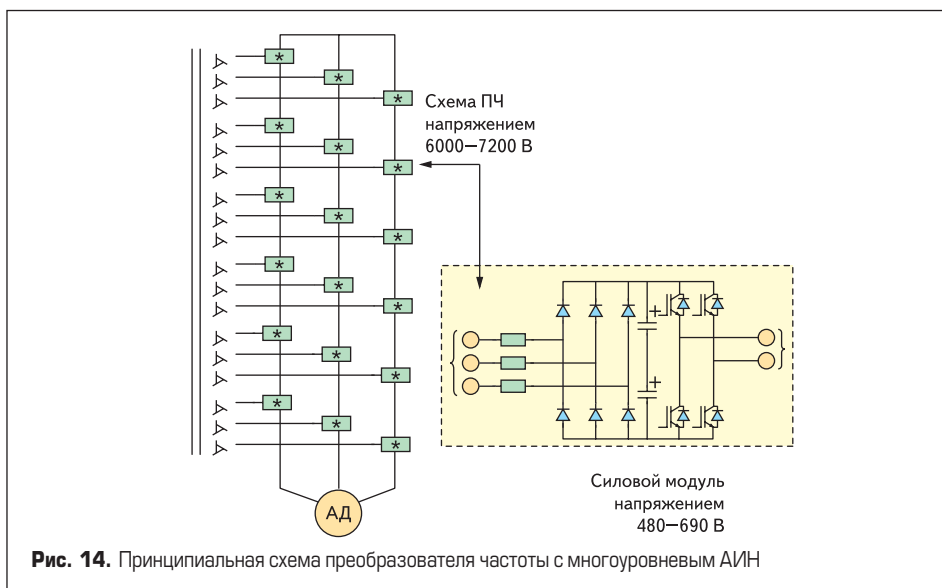


Рис. 14. Принципиальная схема преобразователя частоты с многоуровневым АИН

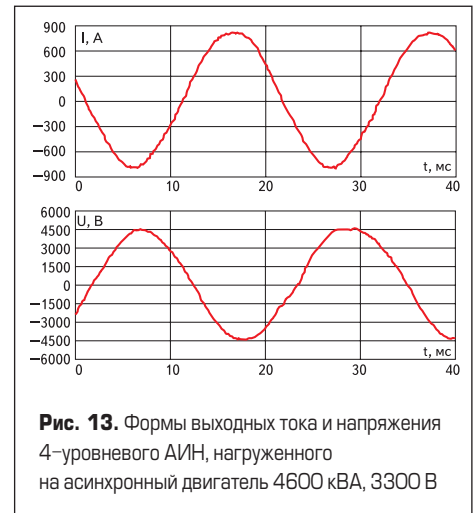


Рис. 13. Формы выходных тока и напряжения 4-уровневого АИН, нагруженного на асинхронный двигатель 4600 кВт, 3300 В

вода выпускают также Toshiba, Mitsubishi, Hyundai, GE.

Схема на рис. 14 иллюстрирует принцип построения многоуровневого ПЧ, в котором удачно решены вопросы ЭМС с сетью электроснабжения и приводным двигателем. Благодаря практически синусоидальной форме выходного напряжения (осциллограмма на рис. 15) такие ПЧ совмещаются без установки специальных фильтров на выходе со стандартными общепромышленными асинхронными двигателями, что позволяет их использовать практически без разгрузки. Применение многообмоточных выходных трансформаторов, обеспечивающих не менее чем 18-пульсное выпрямление, позволяет практически не исказить напряжение в сети.

Входной трансформатор является наиболее сложным элементом преобразователей по топологии Multi-level, вторичные обмотки которого разделены на три группы — по шесть обмоток в группе. Фазовый сдвиг между напряжениями соседних обмоток при, например, эквивалентной 18-фазной схеме составляет 10 эл. градусов. При этом фазовый сдвиг, например, между первой и шестой обмотками группы — 50 эл. градусов.

Каждая обмотка трансформатора подключена к силовому модулю (ячейке Power-Cell), состоящему, как показано на рис. 14, из диодного выпрямителя и IGBT-АИН с ШИМ. В случае неисправности ячейки, благодаря функции Power-Cell-Bypass, дефектная ячейка автоматически шунтируется (выводится из работы),

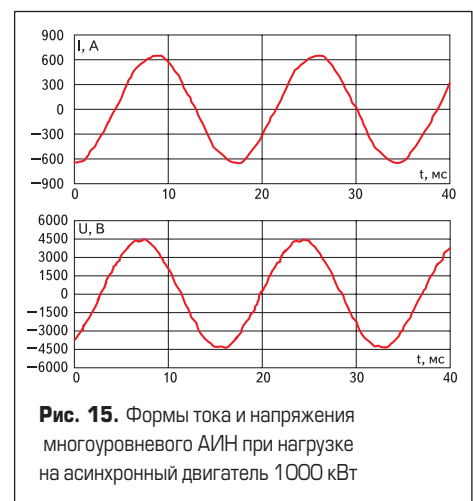


Рис. 15. Формы тока и напряжения многоуровневого АИН при нагрузке на асинхронный двигатель 1000 кВт

Фирма/Показатели	ABB	Siemens	Allen-Bradley	Toshiba	Mitsubishi	GE	ESTEL
Серия	ACS 1000i	Sinamics GM 150	PowerFlex 7000	Tosvert MV	MELTRAC - F500HV	TM Drive	Innovation MV
Выходное напряжение, В	2200, 3300, 4160, 6000 — с вых. трансформатором)	2200, 3300, 4160, 6000, 7200, 10 000, 13 800	2300, 3300, 4160, 6600	3300, 6000	3300, 6600	330 000/3000, 6600/6000	3300, 4160, 6600
Мощность, кВт	315...5000	600...10 000	300...6340	500...5450	500...6600	250...3550 (при 3300 В) и до 7700 (при 6000)	2000...12 500
Диапазон изменения выходной частоты, Гц	0...150 (при 2, 2/3, 3/4, 1,6 кВт); 0...66 (при 6 кВт)	0...250	0...75	0...60 (120)	0...50 (60)	0...50 (60)	0...60
Перегрузочная способность	110% — 1 мин, (150% — 1 мин, опция)	110% — 1 мин	110% — 1 мин, 150% — 1 мин	110% — 1 мин	120% — 1 мин, (150% — 1 мин, опция)	120% — 1 мин, (150% — 1 мин, опция)	120% — 1 мин
Схема преобразователя (стандартное исполнение)	12 (24)-пульсный НВ, АИН по схеме NPC с выходным LC-фильтром	12 (24)-пульсный НВ, АИН по схеме NPC с выходным NPC (опция - выходной LC-фильтр)	6 (12, 18)-пульсный УВ, АИТ с ШИМ	Многообмот. трансформатор 18, 30 и 36-пульсный НВ и 36-пульсный НВ и ИGBT — АИН, АFE — опция	Многообмот. трансформатор 18-пульсный НВ и ИGBT — АИН в фазе	Многообмот. трансформатор 18-пульсный НВ и ИGBT — АИН в фазе	6-пульсный УВ с IGBT-ШИМ, АИН с IGBT-ШИМ и выходным LC-фильтром
КПД, %	98 (без тр-ра)	98,5 (без тр-ра)	97,0 (без тр-ра)	97,6 (с тр-ром)	98 (с тр-ром)	97,0 (с тр-ром)	96,5
Коэффициент мощности выпрямителя	0,96	0,96	0,96 (18-пульсный)	0,95	0,96	0,95	0,9
Тип силовых полупроводниковых приборов	Диоды — НВ, ИGBT — АИН	Диоды — НВ, АИН — IGBT и IGBT	Тир-ры — УВ, ГТО — АИТ	Диоды — НВ, ИGBT — АИН	Диоды — НВ, ИGBT — АИН	Диоды — НВ, ИGBT — АИН	Тир-ры — УВ и АИТ
Принцип коммутации в инверторе	Треугольный ШИМ — модуляция в «звезду»	Треугольный ШИМ — модуляция в «звезду»	ШИМ с избир. подавлением высших гармоник	Многоуровневый ШИМ (Multi-level PWM)	Многоуровневый ШИМ (Multi-level PWM)	Многоуровневый ШИМ (Multi-level PWM)	Комбиниров. ШИМ (Multi-level PWM bridge topologies)
THD сетевой, % (зависит от отношения мощности к. з. сети к мощности ПЧ)	5,2% (напр.) 6,5% (ток) для Хисточн = 5,75%	5,2% (напр.) 6,5% (ток) для Хисточн = 5,75%	≤ 5% (напр.) ≤ 6,5% (ток) для 12-пульсного выпрямителя	1,2% (напр.) 0,8% (ток) для Хисточн = 5,75%	1,2% (напр.) 0,8% (ток) для Хисточн = 5,75%	1,2% (напр.) 0,8% (ток) для Хисточн = 5,75%	5,2% (напр.) 6,5% (ток) для Хисточн = 5,75%
Установка выходного фильтра	sin-фильтр	sin-фильтр	Нет	Есть	Нет	Нет	Не требуется
THD — ток нагрузки, %	≤ 5% с выходным sin-фильтром	≤ 5% с выходным sin-фильтром	≤ 5%	≤ 5%	≤ 5%	< 5%	< 3%
Возможность рекуперативного торможения	Нет	Нет	Есть	Нет	Нет	Нет	Да
Возможность управления трансформатора от ЧРП	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Да
Возможность удаления двигателя от ЧРП на большое расстояние	Нет	Нет	Да	Да	Да	Да	Да
Информационно-управляющая электроника	Микропроцессор	Микропроцессор	Микропроцессор	Микропроцессор	Микропроцессор	Микропроцессор	Микропроцессор (с 2005 г.)
Коммуникационные возможности	Все обычные периферийные шины	Интегрирован Profibus, совместимость с CAN-шиной, Ethernet и другими шинами	Все обычные периферийные шины	Все обычные периферийные шины	Все обычные периферийные шины	Все обычные периферийные шины	RS-485, Profibus
Исполнение	IP21 (воздушное охлаждение) и IP41, 43, 54 (опция — жидкостное охлаждение)	IP22 (воздухоохлаждение), IP43 (жидкостное исполнение)	IP21 (опция — IP42) — возд. охлаждение, IP23 (опция — IP54) — жидкостное охлаждение	IP21 (стандартное исполнение)	IP21	IP21	IP21
Охлаждение	Воздушное — форсированное	Воздушное — до 6000 кВт, жидкостное — от 1800 до 5000 кВт	Воздушное — до 2500 кВт, жидкостное — от 1800 до 5000 кВт	Воздушное, форсированное	Воздушное форсированное	Воздушное форсирован.	Воздушное форсированное
Диапазон температур, °С	1...40	5...40	5...40	0...40	0...40	0...40	0...35 (40 — опция)
Удельные габариты, (без тр-ра), дм/кВт	39,6...13	11,9...2,87 (12-пульсный НВ, воздушное охлаждение)	17,4...3,75 (при возд. охлаждении) 6,5...2,63 (при жидкостном охлаждении) (с тр-ром)	9,315...3,6 (для исполнения на 6000 В)	20,24...7,1 (для исполнения на 6000 В) (с тр-ром)	18,4...8,34 (при 3300 В, 10,5...6,81 — при 6000 В (с тр-ром))	13,2...3,78



Рис. 16. Общий вид конструкции высоковольтных ПЧ различных типов

а управление оставшимися ячейками автоматически корректируется. Это обуславливает весьма высокую живучесть таких ПЧ.

Конструктивная особенность ПЧ с многоуровневым выходным напряжением — неразъемность конструкции, то есть отделить преобразовательную часть от трансформатора практически невозможно. Вторая особенность таких ПЧ в том, что начиная от мощности порядка 2400 кВт при напряжении 6000 В в целом ряде применений устанавливается не один, а два трансформатора. Это, естественно, увеличивает габариты и массу преобразователя.

Таблица представляет сравнительные характеристики высоковольтных ПЧ производства ряда фирм. На рис. 16 показан общий вид конструкции высоковольтных ПЧ различных типов.

Несколько лет назад рядом российских фирм — «Электротекс», «Эрасиб», «Энергокомплект», «Л-СТАРТ», «ЭЛСИЭЛ», «Приводная техника» — начато производство высоковольтных ПЧ по многоуровневой топологии. Объективно оценивая продукцию этих российских производителей, можно, несмотря на небольшую референцию, отметить позитивную динамику совершенствования их технологического уровня: улучшаются конструктивные характеристики и элементная база применяемой силовой электроники, оптимизируется информационно-управляющая электроника и программные продукты, что позволяет оптимизировать функциональные характеристики производимых ПЧ, повысить их конкурентоспособность.

В целом, наметившаяся достаточно устойчивая тенденция интенсификации работ отечественных производителей высоковольтных

ПЧ позволяет с уверенностью прогнозировать на ближайшие 3–4 года процесс постепенно импортозамещения.

Перспективность и эффективность широкого внедрения регулируемых электроприводов при техническом перевооружении и реконструкции ТЭС до 2015 г. можно проиллюстрировать на примере обследованных ВНИИЭ в 1999–2003 гг. 60 ТЭС РАО «ЕЭС России». При общем количестве 1155 мощных механизмов СН суммарной установленной мощностью 1 549 960 кВт, для которых наиболее целесообразно применить частотное регулирование производительности (289 питательных электронасосов, 254 дутьевых вентилятора, 266 дымососов, 270 сетевых насосов, 76 циркуляционных насосов), прогнозируемая прямая экономия электроэнергии составит 2 810 564 000 кВт/ч, что равноценно среднегодовой выработке электроэнергии трех энергоблоков мощностью 200 МВт.

Прогнозируемые затраты на внедрение указанного количества электроприводов «под ключ» составляют порядка 5 млрд руб. При средневзвешенном тарифе 0,6...0,65 руб. за кВт/ч, прогнозируемом на 2010–2015 гг., эффект только от прямой экономии электроэнергии составит порядка 1,83 млрд руб. Окупаемость полных затрат не превысит в среднем 3,5...4 лет.

Литература

1. Волков Э. П., Баринов В.А., Маневич А.С. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики России. М.: Энергоатомиздат, 2001.
2. Основные положения энергетической стратегии России на период до 2020 года // Энер-

гетическая политика России на рубеже веков. М.: «Папирус ПРО», 2001.

3. Берсенева А. П., Шейко П. А., Лазарев Г. Б., Шакарян Ю. Г. Техническое перевооружение и реконструкция ТЭС России с применением энергосберегающих технологий на основе регулируемого электропривода механизмов собственных нужд // Вестник ВНИИЭ-2000. М.: ЭНАС, 2000.
4. Артюх В. М., Литвак В. В. Потери электроэнергии в оборудовании собственных нужд электростанции // Электрические станции. 2007. № 2.
5. Selecting Variable Speed Drives for Flow Control // TM GE Automation Systems. USA, 2004.
6. Лазарев Г. Б. Еще раз о применении регулируемого электропривода // Энергетик. 2004. № 9.
7. Забровский С. Г., Лазарев Г. Б., Мурзаков А. Г. Регулируемый электропривод механизмов СН ТЭС // Итоги науки и техники. Сер. Электропривод и автоматизация промышленных установок. Т. 11. М.: ВИНТИ, 1990.
8. Лазарев Г. Б. Инверторы преобразователей для частотно-регулируемых электроприводов // Новости электротехники. 2005. 2(32).
9. Лазарев Г. Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике // Электротехника. 2005. № 11.
10. Medium Voltage. Drive Evolution // TM GE Automation Systems. USA, 2005.
11. Колпаков А. Схемотехника мощных высоковольтных преобразователей. // Силовая электроника. 2007. №2.
12. Лазарев Г. Б. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электроснабжения собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника. 2004. №10.