

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСХОДОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГЛАВНЫХ КОНТУРАХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС

АВТОРЫ:

ЛАЗАРЕВ Г.Б.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»НОВАКОВСКИЙ А.Н.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»СУЛТАНОВ А.Т.,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Для энергоблоков АЭС с реакторами на быстрых нейтронах применение частотно-регулируемых электроприводов является обяза-

тельным, так как позволяет снизить тепловые нагрузки, исключает тепловые и гидравлические удары в технологическом оборудовании в эксплуатационных режимах.

Ключевые слова: реактор на быстрых нейтронах; энергоблок АЭС; система плавного расхода теплоносителя; частотно-регулируемый электропривод; главные циркуляционные насосы; преобразователь частоты среднего напряжения; технико-экономическая эффективность.



Белоярская АЭС с РУ БН-800

ВВЕДЕНИЕ

Существенное влияние на развитие экономики РФ оказывает ее энергообеспеченность, связанная с состоянием энергетики. Известны два ключевых способа повышения энергообеспеченности: интенсификация освоения невозобновляемых энергоресурсов и энергосбережение, повышение энергоэффективности. Решение проблемы энергообеспеченности при минимальном ущербе окружающей среде в любом из прогнозируемых вариантов развития энергетики лежит на пути реализации концепции энергозамещения и энергосбережения [1–5]. При этом важная роль в развитии энергетики РФ отводится атомной энергетике. Долговременная стратегия развития атомной энергетики предполагает переход к широкому использованию перспективных инновационных ядерных технологий и строительство энергоблоков АЭС с реакторными установками на «быстрых» нейтронах (РУ БН) с замкнутым ядерным топливным циклом [6]. В соответствии с государственными программами развития ядерного энергетического комплекса предполагается, что к 2030 г. таких энергоблоков будет не менее 10%. Здесь уместно отметить, что Россия является лидером в разработке «быстрых» реакторов.

В статье дан краткий обзор развития РУ БН, рассмотрены существующие на практике подходы к созданию систем управления расходом натрия теплоносителя для охлаждения таких реакторов. На примере разработки системы плавного регулирования расхода теплоносителя для РУ БН-800 Белоярской АЭС, выполненной ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», показано, что надежность, безопасность и экономичность работы энергоблока в эксплуатационных режимах обеспечивается энергоэффективным управлением главными циркуляционными насосами (ГЦН), регулирова-

РЕАКТОРНЫЙ ЗАЛ БН-600 НА БЕЛОЯРСКОЙ АЭС

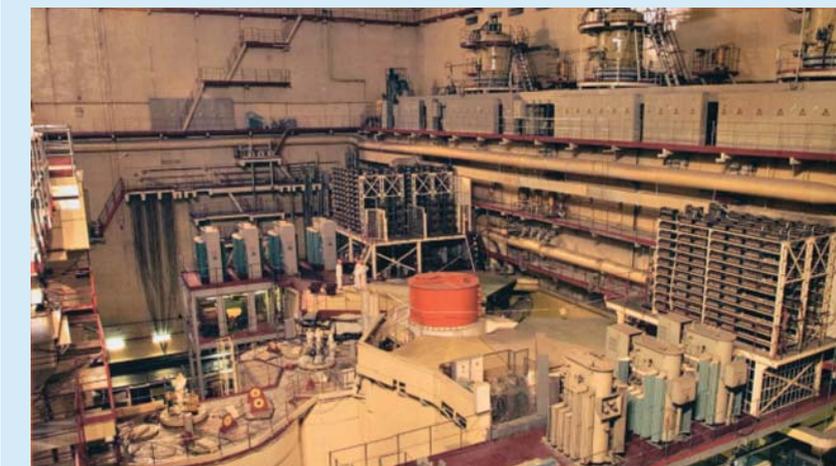


Рис. 1

нием их электроприводами с плавно изменяемой частотой вращения. Рассмотрены технические и экономические преимущества применения электроприводов с регулируемой частотой вращения.

ОБЗОР РАЗВИТИЯ «БЫСТРЫХ» РЕАКТОРОВ

В 1960–1980-е гг. был создан целый ряд демонстрационных «быстрых» реакторов в СССР, США, Франции, Великобритании и Германии. По подсчетам ФЭИ им. А.И. Лейпунского (Обнинск) в мире было разработано более 30 проектов «быстрых» реакторов. Примерно 20 из них различной мощности были реализованы в экспериментальных установках. К середине 1990-х — началу 2000-х гг. большинство из этих проектов были прекращены из-за высоких эксплуатационных затрат и повышенных рисков аварий.

В начале 21 века в мире осталась практически единственная страна — Россия, имеющая наибольший опыт создания реакторов на «быстрых» нейтронах, отработанные технологии и успешный опыт эксплуатации промышленных «быстрых» реакторов. Так, реактор БН-600 (рис. 1), эксплуатирующийся 35 лет в составе 3-го энергоблока мощностью 600 МВт Белоярской АЭС — единственный в мире действующий промышленный энергетический реактор такой мощности [7].

Следующим этапом развития технологии «быстрых» реакторов стал более мощный реактор БН-800, являющийся модификацией реактора БН-600, смонтированный в составе 4-го энергоблока мощностью 800 МВт Белоярской АЭС (рис. 2), на котором в настоящее время ведутся пуско-наладочные работы по его освоению и вводу в эксплуатацию в конце 2015 г.

В 2010 г. были начаты НИОКР и проектирование перспективного коммерческого «быстрого» реактора

ВИД 4-ГО ЭНЕРГБЛОКА БЕЛОЯРСКОЙ АЭС С РУ БН-800 (2014 Г.)



Рис. 2

СТАДИИ РАЗВИТИЯ «БЫСТРЫХ» РЕАКТОРОВ В РОССИИ



Рис. 3

четвертого поколения мощностью 1220 МВт (рис. 3) с замкнутым ядерным топливным циклом, который будет сооружен на площадке Белоярской АЭС в составе 5-го энергоблока. Ввод энергоблока намечен на 2020 г.

Рис. 3 иллюстрирует стадии создания в России «быстрых» реакторов [8]. Следует отметить, что значительный интерес к этому перспективному в атомной энергетике направлению проявляет целый ряд стран. Так, например, в Индии ведется строительство демонстрационного «быстрого» реактора PFBR-500 мощностью 500 МВт. В 2011 г. в Институте атомной энергии Китая был введен в эксплуатацию демонстрационный «быстрый» реактор CEFR-25, мощностью 25 МВт (рис. 4), разработанный по российской технологии. Система плавного регулирования натриевого теплоносителя на основе частотно-регулируемых электроприводов ГЦН первого и второго контуров для охлаждения этого реактора (ГЦН-1, ГЦН-2) была разработана в 2005–2008 гг. специалистами ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» [9]. В Китае по контракту с РФ планируется создание на Фуцзянской Саньминской АЭС двух энергоблоков с РУ БН мощностью 600 МВт, являющихся в определенной мере аналогами третьего энергоблока Белоярской АЭС. С 2010 г. во Франции с учетом предыдущего опыта создания демонстрационного энергоблока с РУ БН SuperPhenix, выведенного из эксплуатации в начале 2000-х гг., начаты работы по созданию промышленного энергетического реактора на «быстрых» нейтронах ASTRID-600 мощностью 600 МВт.

Мировой опыт создания «быстрых» реакторов основан на применении в главных контурах для охлаждения РУ преимущественно натриевого теплоносителя из-за его высокой теплопроводности, большой теплоемкости и высокой температуры кипения [7, 10]. Принципиальной

особенностью РУ БН, отличающихся достаточно высокой динамикой процессов, является необходимость плавного изменения расхода натриевого теплоносителя как в силу особенностей технологической схемы РУ, так и в связи с требованиями к маневренности энергоблоков с «быстрыми» реакторами.

СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫМИ НАСОСАМИ РУ

В системах управления натриевыми насосами в главных контурах «быстрых» реакторов в мировой практике используются различные технические решения, основанные на применении электродвигателей переменного тока. Так, в отечественной практике на разных стадиях развития РУ БН для управления ГЦН первого и второго контуров (ГЦН-1, ГЦН-2) получили применение электроприводы на основе:

- вертикального двухскоростного (полусо-переключаемого) асинхронного двигателя

с короткозамкнутым ротором (реактор БН-350). Такой электропривод с прямым пуском от сети электроснабжения СН обеспечивает ступенчатое управление частотой вращения ГЦН на двух дискретных частотах вращения — номинальной, соответствующей номинальной мощности РУ, и минимальной, обеспечивающей режим расхолаживания реактора и его перезагрузки топливом. Мощность РУ регулируется изменением числа включенных петель с нерегулируемым, работающим на постоянной номинальной частоте вращения, электродвигателем ГЦН [7, 11]; асинхронного вентиляционного каскада в сочетании с реостатно-контакторным управлением вертикальным асинхронным двигателем с фазным ротором (реактор БН-600, энергоблок № 3 Белоярской АЭС). Применение реостатно-контакторной станции в роторе асинхронного двигателя обеспечивает ступенчатое

управление частотой вращения ГЦН и резервирование при отказе преобразовательной части АВК [12–14]; частотно-регулируемого электропривода на основе вертикального асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и дополнительной низковольтной обмоткой «малой скорости» в статоре, используемой для расхолаживания реактора при обесточивании электроснабжения СН энергоблока и выполненной независимой от обмотки «большой скорости» и преобразователя среднего напряжения с регулируемой частотой с его резервированием при неисправностях, обеспечивающего плавный пуск электропривода и плавное управление частотой вращения ГЦН (реактор БН-800, энергоблок № 4 Белоярской АЭС) [15, 16]; частотно-регулируемого электропривода на основе вертикального асинхронного двигателя с короткозамкнутым



Рис. 4
Энергоблок 25 МВт с РУ БН
CEFR-25 (КНР)

ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ ГЛАВНЫХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ НАСОСОВ РУ БН АЭС

Установка	Электропривод ГЦН-1						Электропривод ГЦН-2				
	Мощность, МВт	Количество, шт.	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Двигатель	Система регулирования	Количество, шт.	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Двигатель	Система регулирования
Бор-60 (СССР)	12	2	300	1000	Двигатель постоянного тока	Г-Д	—	—	—	—	—
БН-350 (СССР)	350	2	1700	1000/250	АД с к.з. ротором (двухскоростной)	Прямой пуск	6	1000	1000/250. Расход ЭМН 0–3500 м³/ч	ЦЛИН 3/3500	Индукционное регулирование
БН-600 (СССР)	600	6	3500	250–970	АД с фазным ротором	АВК	3	1600	250–970	АД с фазным ротором	АВК
БН-800 (Россия) ¹⁾	890	3	5000	250–980	АД с к.з. ротором с дополнительной обмоткой скорости	Статический преобразователь частоты	3	2500	250–980	АД с к.з. ротором	Статический преобразователь частоты
БН-25 (CEFR) (Китай) ²⁾	25	2	160	150–1000	АД с к.з. ротором с дополнительной обмоткой скорости	Статический преобразователь частоты	2	110	150–1000	АД с к.з. ротором	Статический преобразователь частоты
Phenix (Франция)	250	3	990	250–970	АД с фазным ротором	Реостатное	3	—	250–975	АД с фазным ротором	Реостатное
Super Phenix (Франция)	1200	3	3850	996	АД	Частотное (синхронное)	4	2000	—	СД	Частотное (вентильный привод)
PFR (Великобритания)	250	2	—	200–1000	АД с к.з. ротором	Гидромурфта. Пони-мотор	—	—	—	—	—
Enrico Fermi (США)	65	3	780	900	АД с фазным ротором	Реостатное. Пони-мотор	3	250	900	АД с фазным ротором	Реостатное
SNR-300 (ФРГ)	312	3	1500	980	АД с к.з. ротором	Реостатное. Пони-мотор	—	660	980	АД с к.з. ротором	Реостатное. Пони-мотор

Примечание:

¹⁾ НИОКР и проект системы управления ЧРП с расходом натриевого теплоносителя ГЦН на основе частотно-регулируемых электроприводов с резервированием отказов преобразователей частоты среднего напряжения по каждой петле первого и второго контуров.

²⁾ НИОКР и проект системы управления расходом натриевого теплоносителя ГЦН первого и второго контуров РУ на основе низковольтных частотно-регулируемых электроприводов были выполнены ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС».

Таблица 1

ротором и преобразователя среднего напряжения с регулируемой частотой (четырёхпетлевой трехконтурный реактор нового поколения БН-1200 с пассивной системой теплоотвода для проектируемого энергоблока № 5 Белоярской АЭС) [7, 8].

В зарубежной практике для регулирования ГЦН на АЭС с РУ БН получили применение электроприводы на основе [7, 14]:

- вертикального асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, регулируемого гидромурфтой, обеспечивающей плавное управление частотой вращения ГЦН. Для осуществления режима штатного и аварийного расхолаживания реактора электропривод снабжен пони-мотором (энергоблок 250 МВт с реактором PFR-250, Великобритания; энергоблок 300 МВт с реактором SNR-300, ФРГ);
- частотно-регулируемого электропривода с вертикальным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором и низковольтным преобразователем с регулируемой частотой, обеспечивающего плавный пуск электропривода и плавное управление режимами ГЦН (реактор CEER-25, КНР);
- частотно-регулируемого электропривода с фазным ротором и реостатным (ступенчатым) регулированием частоты вращения главных циркуляционных насосов (энергоблок 250 МВт с реактором Phenix, Франция);

- частотно-регулируемого электропривода на основе синхронного двигателя и преобразователя среднего напряжения с регулируемой частотой ГЦН второго контура энергоблока 1200 МВт с реактором Super Fenix (Франция).

Таблица 1 иллюстрирует отличительные особенности систем регулирования расхода теплоносителя на основе электроприводов ГЦН РУ БН.

СИСТЕМЫ ПЛАВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЦН

Как показывают исследования и опыт эксплуатации энергоблока БН-600, целесообразность применения систем плавного регулирования расхода теплоносителя в главных контурах РУ на основе частотно-регулируемых электроприводов ГЦН определяется повышением надежности и энергоэффективности во всех рабочих режимах РУ БН, обеспечением устойчивой работы энергоблока на частичных нагрузках и безопасности в аварийных режимах.

Плавное изменение расхода теплоносителя путем регулирования частоты вращения электроприводов главных циркуляционных насосов в целом позволяет существенно снизить колебания температур и давлений по петлям в главных контурах РУ, повысить надежность и долговечность за счет малоциклового уста-



V
Открытый шахматный турнир энергетиков памяти М. М. Ботвинника



2015

ноябрь 2015 года, г. Москва, конференц-зал ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Вот уже в пятый раз пройдет открытый шахматный турнир в память о великом шахматисте и талантливом энергетике Михаиле Ботвиннике.

Состоится личное и командное первенство по правилам ФИДЕ для быстрых шахмат.

ПРИГЛАШАЕМ КОМАНДЫ ЭНЕРГЕТИКОВ ПОДДЕРЖАТЬ НАШУ ДОБРУЮ ТРАДИЦИЮ И ПРИНЯТЬ УЧАСТИЕ В ЕЖЕГОДНОМ ОТКРЫТОМ ШАХМАТНОМ ТУРНИРЕ!



реклама

Отчет о IV Открытом шахматном турнире и условия участия смотрите на сайте турнира <http://turnir.ntc-power.ru>

лости металла энергооборудования, повысить КПД нетто энергоблока в маневренном режиме в диапазоне изменения его мощности 25–100% [16, 17].

В рабочих (стационарных) режимах плавное изменение расхода теплоносителя в главных контурах РУ позволяет повысить экономичность и надежность работы теплообменного оборудования, парогенератора и турбины, включая режим «скользящих» параметров пара, снижая при этом термические напряжения в конструкциях, что имеет важное значение в маневренных режимах энергоблока.

Кроме того, появляется возможность снизить потери электроэнергии в СН на частичных уровнях нагрузок энергоблока и повысить его КПД за счет снижения частоты вращения

ГЦН, что оказывается существенным из-за значительной мощности электроприводов ГЦН в общей мощности потребителей собственных нужд (СН) энергоблока. Так, например, суммарная мощность электроприводов ГЦН РУ БН-600 составляет 15 300 кВт (~2,5% номинальной мощности энергоблока), а суммарная мощность электроприводов ГЦН РУ БН-800 — 22 500 кВт (~2,8% номинальной мощности энергоблока).

В переходных режимах, таких, например, как режим самозапуска после глубоких снижений напряжения СН с последующим его восстановлением, частотно-регулируемый электропривод (ЧРП) обеспечивает снижение тепловых и гидравлических ударов в тепло-механическом и электрическом оборудовании и создание условий, способствующих развитию есте-

ственной циркуляции теплоносителя в главных контурах [14, 17].

Применение для управления режимами главных циркуляционных насосов асинхронного электропривода с регулируемой частотой вращения является новым перспективным направлением энергоэффективной технологии, являющимся обязательным для РУ БН [16, 17]. Выбор того или иного типа ЧРП должен производиться с учетом обеспечения надежной и безопасной работы энергоблока с РУ БН в рабочих эксплуатационных и аварийных режимах, исходя из анализа которых могут быть сформулированы технические требования к системе плавного регулирования расхода теплоносителя и алгоритмам работы электроприводов ГЦН.

К частотно-регулируемому электроприводу ГЦН как основному элементу системы плавного регулирования расхода теплоносителя РУ предъявляется целый ряд требований, из которых к ключевым можно отнести следующие требования:

- ЧРП должны обеспечивать плавное регулирование расхода теплоносителя в каждой петле первого и второго контуров РУ путем изменения частоты вращения ГЦН для ограничения колебаний температуры в теплонапряженных узлах теплообменного оборудования, а также влияния параллельно работающих насосов друг на друга. Изменения частоты вращения ГЦН первого и второго контуров должны происходить в зависимости от повышения или понижения мощности энергоблока (РУ) и режимов его работы. Должна быть обеспечена возможность подрегулирования

расхода теплоносителя индивидуально в каждой петле первого и второго контуров РУ, что позволит устранить нежелательный перекоп гидравлических сопротивлений по петлям. При работе энергоблока в режимах частичной мощности или в режиме расхолаживания РУ требуется обеспечивать одновременное снижение частоты вращения всех работающих ГЦН; Преобразователь частоты ЧРП должен обеспечивать надежный самозапуск выбегающего электропривода с ГЦН после глубоких снижений напряжения в сети СН или перерывов электроснабжения длительностью порядка 1,5 с с подхватом вращающегося электродвигателя после восстановления напряжения и минимальным дополнительным снижением частоты его вращения; Должна быть обеспечена ЭМС преобразователя частоты с сетью электроснабжения СН энергоблока в соответствии с требованиями стандарта на качество электроэнергии; Должны быть обеспечены минимальные искажения выходного тока преобразователя частоты и обеспечено его электромагнитное совмещение с приводным электродвигателем ГЦН. Это требование является важным, так как высшие гармоники приводят к появлению колебаний электромагнитного момента, возникновению резонансов и крутильных колебаний валопроводов в много-массовой вертикальной

УПРОЩЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ POWER FLEX 7000

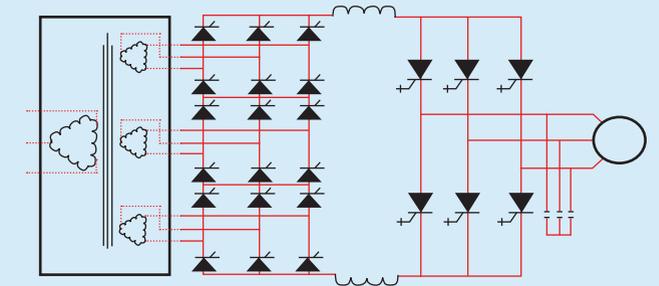


Рис. 6

конструкции «центробежный насос — асинхронный двигатель — маховик», а потери от высших гармоник токов влияют на дополнительный нагрев электродвигателя; Резервирование при отказе преобразователя частоты в ЧРП ГЦН любой из петель первого и второго контуров РУ из-за возможных при эксплуатации неисправностей. Выполнение этого требования является принципиально важным, так как повышает надежность и безопасность эксплуатации и коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) энергоблока за счет исключения отключения петли с ГЦН, которое сопровождается разгрузкой РУ, снижением мощности энергоблока и соответствующим недоотпуском электроэнергии.

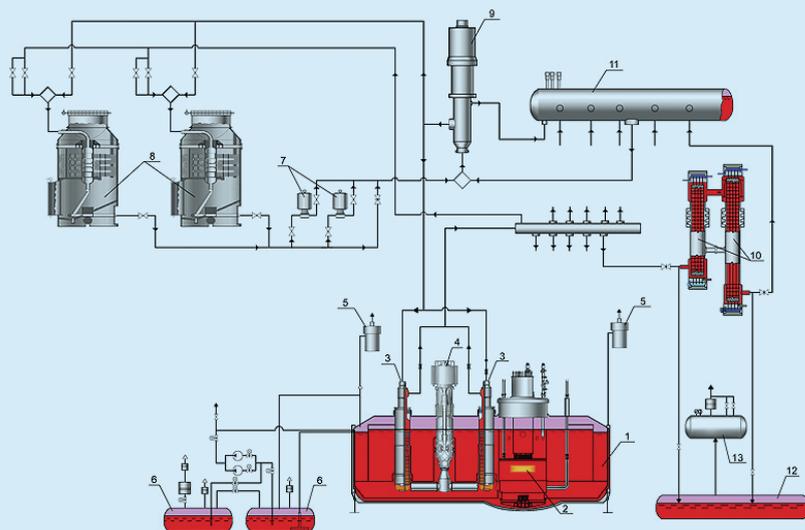
С учетом этих требований в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» была разработана полнофункциональная система управления частотой вращения ГЦН первого и второго контуров РУ БН-800 на основе электроприводов

среднего напряжения с регулируемой частотой вращения с резервированием преобразователей частоты при их отказах. Рис. 5 иллюстрирует упрощенную технологическую схему РУ БН-800, который имеет интегральную компоновку и выполнен с трехконтурной трехпетлевой системой теплообмена. Первый и второй контуры РУ включают три ГЦН (по одному в каждой петле) с вертикальными асинхронными приводными двигателями 5000 кВт, 6 кВ в первом контуре и 2500 кВт, 6 кВ во втором контуре.

Требуемый диапазон расхода теплоносителя в петлях первого и второго контуров РУ, определяемый диапазоном изменения нагрузок энергоблока 25–100% номинальной мощности, регулируется преобразователями частоты, изменяющими частоту вращения электродвигателей ГЦН. Энергоблок БН-800 — моноблочный с турбоагрегатом мощностью 880 МВт.

Использование в электроприводах ГЦН первого и второго контуров РУ БН-800 мощных асинхронных двигателей напряжением 6 кВ обуславливает в качестве наиболее оптимального решения применение для их регулирования преобразователей частоты среднего напряжения. При определении типа преобразова-

ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА РУ БН-800



1 — реактор; 2 — активная зона; 3 — промежуточный теплообменник; 4 — ГЦН-1; 5 — гидрозатвор; 6 — бак-компенсатор; 7 — насос электромагнитный; 8 — теплообменник воздушный; 9 — ГЦН-2; 10 — секция ПГ; 11 — бак буферный; 12 — бак дренажный II контура; 13 — сосуд аварийного сброса.

Рис. 5

теля с регулируемой выходной частотой, формирующего режимы работы ЧРП ГЦН, принципиально важным является вопрос выбора топологии такого преобразователя [15, 18, 19]. На основе анализа существующих топологий и типов преобразователей частоты среднего напряжения, производимых отечественными и зарубежными фирмами, опыта их применения для регулирования мощных

электронасосов [20] была принята оптимальная применительно к ЧРП ГЦН РУ БН-800 топология двухзвенного преобразователя частоты с 18-пульсным сетевым выпрямителем на SCR-тиристорах и автономным инвертором тока с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ-АИТ) на симметричных коммутационных тиристорах с интегрированным управлением SGCT. По такой тополо-

гии выполнены высокотехнологичные преобразователи частоты серии Power Flex 7000 фирмы Rockwell Automation (Allen-Bradley).

Упрощенная электрическая схема на рис. 6 иллюстрирует структуру преобразователя частоты для электропривода ГЦН. Для повышения безопасности, надежности и энергоэффективности работы энергоблока РУ БН-800 в эксплуатационных и аварийных режимах система управления электроприводами ГЦН выполнена с резервированием преобразователей частоты по принципу «один на три» (рис. 7) [21, 22].

Алгоритм управления, формируемый в системе «один на три» с резервированием отказа любого преобразователя частоты, заключается в том, что система управления фиксирует отказ ЧРП ГЦН в любой петле первого или второго контуров РУ и аварийное отключение его преобразователя частоты, переключает электродвигатель, управлявшийся отказавшим преобразователем частоты, на резервный преобразователь частоты, находящийся в «горячем» резерве. Система управления резервного преобразователя частоты определяет текущую частоту вращения выходящего электродвигателя с ГЦН и обеспечивает его подхват и подгонку частоты вращения в соответствии с текущим режимом РУ.

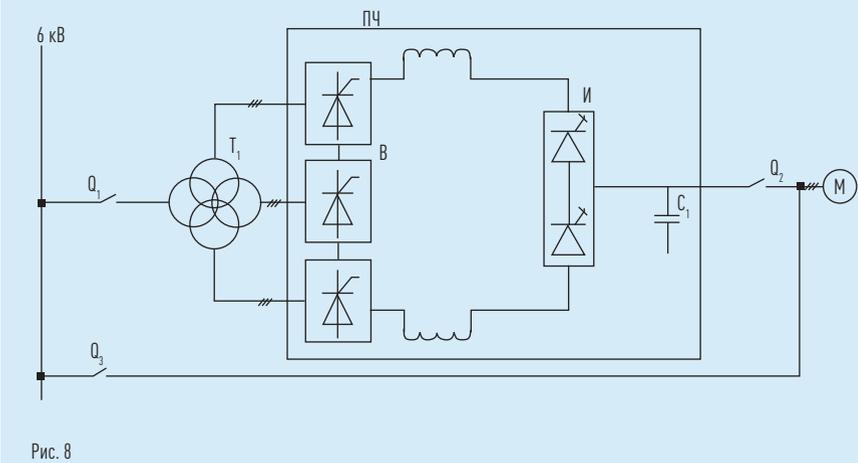
Для повышения надежности и гибкости резервирования в работе [20] предложен алгоритм двухступенчатого резервирования для ситуации, когда резервный преобразователь частоты находится в «холодном» резерве. В этом случае система управления переключает электродвигатель, управлявшийся отказавшим преобразователем частоты, на сеть электроснабжения через байпасный выключатель (структурная схема показана на рис. 8). Электродвигатель ГЦН переходит в режим работы с постоянной номинальной частотой

вращения. Для исключения температурных перекосов по петлям система управления обеспечивает подгонку частот вращения регулируемых ГЦН к частоте вращения нерегулируемого ГЦН, формирует команду на включение выключателя и подачу напряжения на преобразователь частоты, находящийся в «холодном» резерве, и переключает электродвигатель на резервный преобразователь частоты, система управления которого обеспечивает подхват выбегающего электродвигателя с ГЦН резервным преобразователем частоты и подгонку частот вращения ГЦН во всех трех петлях в соответствии с текущим режимом РУ.

В обоих случаях резервирования после восстановления работоспособности отказавшего преобразователя частоты система управления осуществляет обратный перевод электродвигателя ГЦН с резервного преобразователя частоты на рабочий. Предложенный принцип резервирования, реализованный в проекте системы частотно-регулируемых электроприводов ГЦН четвертого энергоблока Белоярской АЭС, позволяет предотвратить отключение петли в главных контурах РУ, повысить надежность, безопасность и энергоэффективность работы энергоблока, исключить недоотпуск электроэнергии и повысить КИУМ.

Исследования показали, что применение преобразователей частоты Power Flex 7000 полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам управления частотой вращения ГЦН в части обеспечения плавности пуска и точности поддержания частоты вращения электроприводов насосов в диапазоне регулирования, режима самозапуска и подхвата выбегающего электропривода ГЦН с минимальным снижением частоты вращения, ЭМС преобразователя частоты с системой электроснабжения СН за счет применения 18-пульсной

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЦН ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА СЕТЬ СН ЧЕРЕЗ БАЙПАСНЫЙ ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ С ШУНТИРОВАНИЕМ НЕИСПРАВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ



схемы сетевого тиристорного выпрямителя [15, 23, 24].

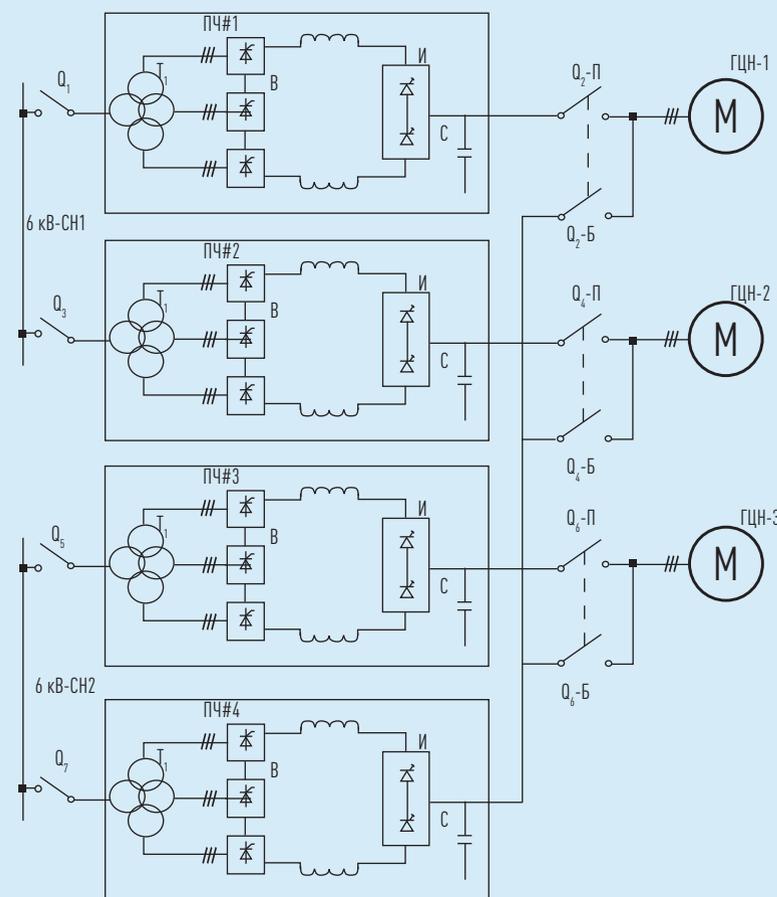
ШИМ-АИТ формирует в статоре приводного асинхронного двигателя практически синусоидальную форму выходного тока и напряжения с THD не более 2,5–3,5%, что исключает недопустимые колебания электромагнитного момента, приводящие к возникновению крутильных колебаний валов валопроводов в многомассовой вертикальной конструкции «центробежный насос — асинхронный двигатель — маховик» [18]. Практически исключены воздействия dU/dt на изоляцию статора и ограничения на длину кабеля, связывающего преобразователь частоты с асинхронным двигателем. Многофункциональность и гибкость микропроцессорной системы управления преобразователей Power Flex позволяет реализовать требуемые

алгоритмы управления системы управления частотой вращения ГЦН с учетом резервирования.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ГЦН

Были исследованы электромагнитные и электромеханические процессы в электроприводе ГЦН при скачкообразных изменениях напряжения сети, которые могут возникать в точке общего присо-

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРЕМЯ ГЦН ПЕРВОГО (ВТОРОГО) КОНТУРА РУ БН-800 С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ



ОСЦИЛЛОГРАММЫ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЦН-1 С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ АВЦ-5000 И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ POWER FLEX 7000L 657A, 6 КВ ПРИ СКАЧКООБРАЗНЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ НА ШИНАХ 6 КВ СН. РАСЧЕТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ НА ВХОДЕ ПЧ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРИНЯТО РАВНЫМ 1,15 НОМИНАЛЬНОГО:

а) уменьшение напряжения до 0,89 номинального
б) восстановление напряжения до исходного значения

$$U_{PI} = 1.05 \times U_{1n}, U_{PI} = 0.89 \times U_{1n}$$

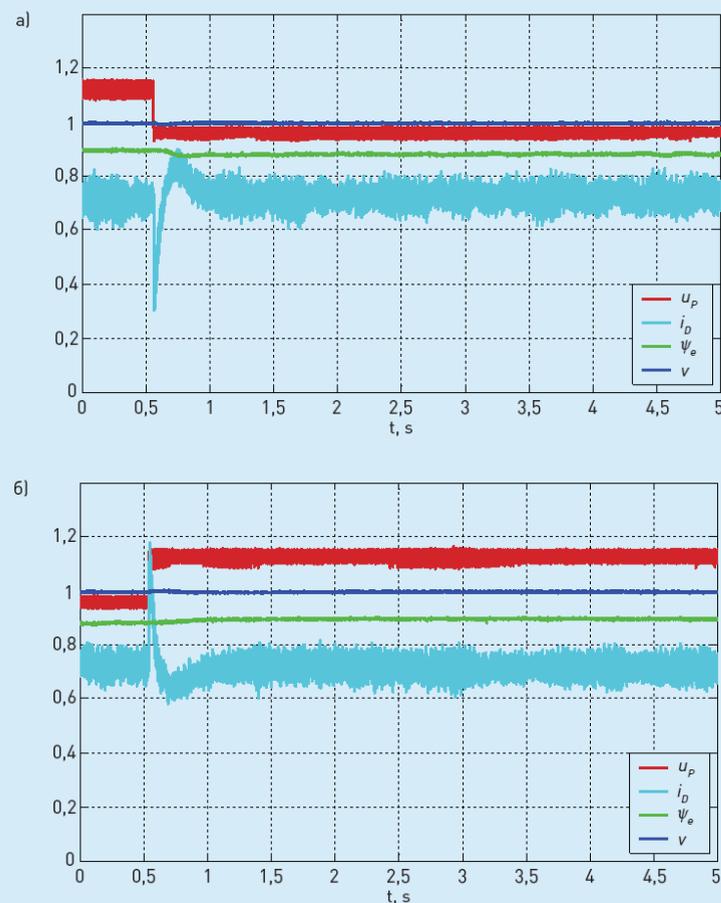


Рис. 9

единения (ТОП) на шинах 6 кВ СН при удаленных К.З, при частотном пуске и торможении электропривода ГЦН-1 и при его самозапуске.

На осциллограммах рис. 9 показаны процессы при скачкообразных колебаниях напряжения СН в ТОП преобразователей частоты. Как видно из осциллограмм, при провале напряжения от установившегося значения, равного $1,15 U_{сн}$ до $0,89 U_{сн}$ (рис. 9а), ток i_D звена постоянного тока падает от установившегося значения $0,78$ о.е. до примерно $0,34$ о.е. и затем возвращается к прежнему значению с одним колебанием, амплитуда которого $\sim 0,9$ о.е. Частота вращения электропривода (v) и, следовательно, производительность ГЦН при этом практически не меняются. Магнитный поток асинхронного двигателя также не меняется.

При восстановлении напряжения от $0,89$ до $1,15$ о.е. (рис. 9б) ток i_D скачком возрастает до значения $\sim 1,2$. Частота вращения и магнитный поток в двигателе практически не меняются.

На рис. 10 приведены осциллограммы процессов при частотном пуске (а) и торможении (б) электропривода ГЦН-1. Время выхода электропривода с ГЦН-1 на валу на номинальную частоту вращения составляет $\sim 11-12$ с при изменении относительного значения электромагнитного момента M_F от $0,4$ о.е. в начале пуска до $\sim 0,7$ о.е. при установившейся частоте вращения электропривода. Ускорение электропривода при пуске (среднее) соответствует требуемому (~ 100 мин⁻¹/с). При моделировании режима частотного пуска учтена задержка на предварительное намагничивание, равная $2,5$ с.

На начальном этапе разгона (с разомкнутой обратной связью по скорости) величина начального значения пускового момента установлена равной $0,35$ о.е. После

ОСЦИЛЛОГРАММЫ ЧАСТОТНОГО ПУСКА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЦН-1 ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ POWER FLEX 7000 (657 А, 6 КВ):

а) пуск электропривода до номинальной частоты вращения с задержкой пуска на предварительное намагничивание двигателя, равной $2,5$ с;
б) форсированное торможение (с переходом в режим рекуперации)

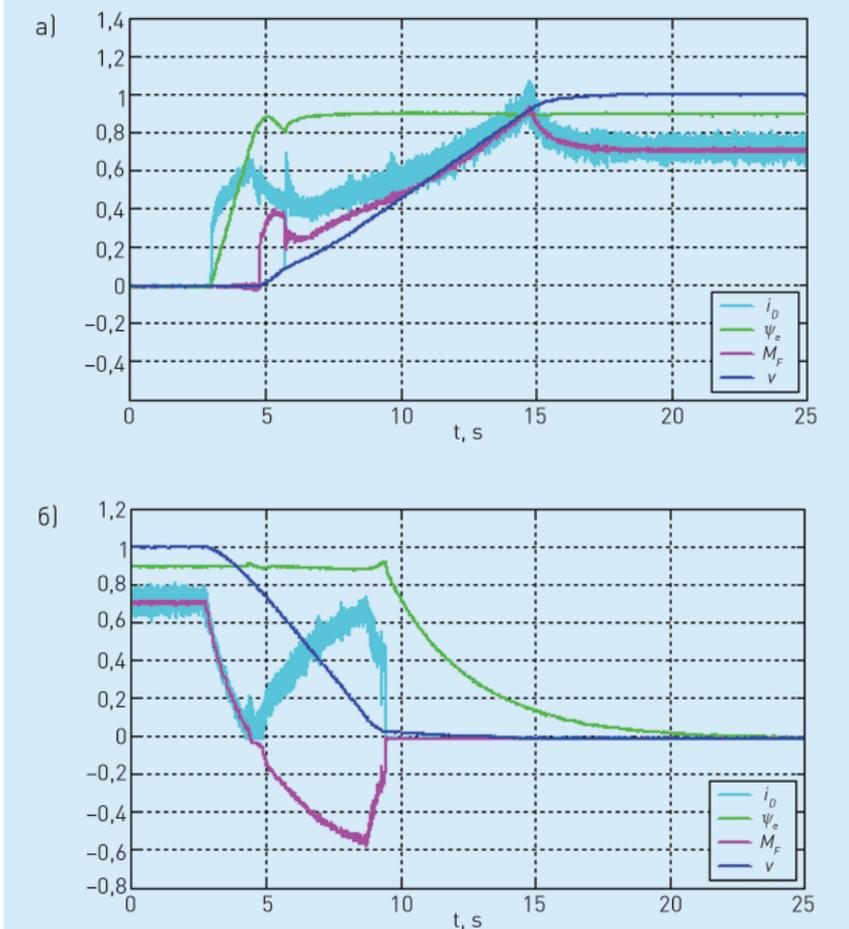


Рис. 10

замыкания контура обратной связи по скорости значение электромагнитного момента двигателя при переходе к работе электропривода с замкнутым контуром обратной связи по скорости оставалось равным $0,35$ о.е. Как видно из осциллограммы, скачков электромагнитного момента при замыкании обратной связи не наблюдается.

В режиме частотного торможения, начиная с $\sim 75\%$ номинальной скорости, преобразователь частоты начинает выдавать энергию в сеть электроснабжения СН, обеспечивая при этом форсированный по сравнению со свободным выбегом останов насосного агрегата. Как видно из осциллограммы на рис. 10б, время от начала торможения до полного останова электропривода ГЦН-1 составляет порядка $8,5$ с с ускорением ~ 115 мин⁻¹/с.

При рекуперативном торможении момент M_F изменяется от $\sim 0,7$ о.е. в начале торможения до $\sim (-0,6$ о.е.) при снижении частоты вращения до $v = 0,1$ о.е. Максимум электромагнитного момента совпадает по времени с максимумом тока i_D и составляет $\sim 0,7$ о.е.

Исследования электромагнитных и электромеханических процессов при самозапуске электропривода ГЦН-1 (Auto-Restart) при восстановлении напряжения СН после перерыва длительностью $1,55$ с проводилось из режима номинальной ($v = 1$) и пониженной ($v = 0,25$) частоты вращения электропривода. На рис. 11 показаны осциллограммы, иллюстрирующие процессы при самозапуске электропривода при исходной частоте вращения, равной номинальной ($v = 1$). На рис. 12 приведена осциллограмма, иллюстрирующая процесс самозапуска при частоте вращения электропривода, равной $v = 0,25$ номинальной. При моделировании принята настройка системы управления преобразователя частоты

с введением задержки на пуск $2,5$ с для намагничивания асинхронного двигателя.

Как видно из осциллограммы на рис. 11а, после восстановления

напряжения имеет место дополнительная задержка начала нарастания частоты вращения. При этом дополнительное снижение частоты вращения электропривода составляет примерно 50 мин⁻¹ за время

0,2–0,3 с. Выход на установившийся режим ($v = 1$) за 4–4,5 с. Максимальное значение тока $i_D \sim 1,1$ о.е. Нарастание электромагнитного момента M_F за время ~ 2 –2,5 с (осциллограмма на рис. 11б). При моделировании самозапуска электропривода ГЦН-1 от исходной частоты вращения $v = 0,25$ его частота вращения уменьшается за время перерыва электроснабжения СН $\sim 1,55$ с на ~ 10 мин $^{-1}$ и устанавливается, как видно из осциллограммы на рис. 12, до исходного значения за ~ 2 с.

Подхват преобразователем частоты Power Flex 7000 выходящего электродвигателя АВЦ-5000 с ГЦН (режим Flying Start) сопровождается снижением его частоты вращения от номинальной на $\sim 20\%$ в течение $\sim 1,2$ с.

Этот процесс иллюстрируется осциллограммой на рис. 13а.

Поток асинхронного двигателя ψ_e и измеренный сигнал обратной связи по потоку — переменная Flux Feedback от значения $V = 0,8$ — практически не меняются.

Разгон электропривода ГЦН-1 до прежнего значения частоты вращения ($v = 1$) после подхвата его преобразователем частоты происходит за время не более 3 с. Осциллограмма на рис. 13б иллюстрирует процессы подхвата электродвигателя при частоте вращения 0,5 о.е. При этом имеет место снижение оборотов до $v \sim 0,42$ за примерно 1 с. Разгон электропривода до прежней частоты вращения после подхвата длится не более 1,5–1,7 с.

Как показано в работах [23, 24], влияние преобразователя частоты на сеть СН и асинхронный двигатель в значительной мере определяется его топологией и алгоритмами управления автономным инвертором.

ОСЦИЛЛОГРАММА УСПЕШНОГО САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЦН-1. ИСХОДНЫЙ РЕЖИМ — НОМИНАЛЬНАЯ НАГРУЗКА ПРИ НОМИНАЛЬНОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ 995 МИН $^{-1}$:

а) Показаны: напряжение питания U_p , ток i_D , поток двигателя ψ_e , частота вращения v
б) Показаны: ток i_D , потокоцепление ψ_e , электромагнитный момент M_F , частота вращения v

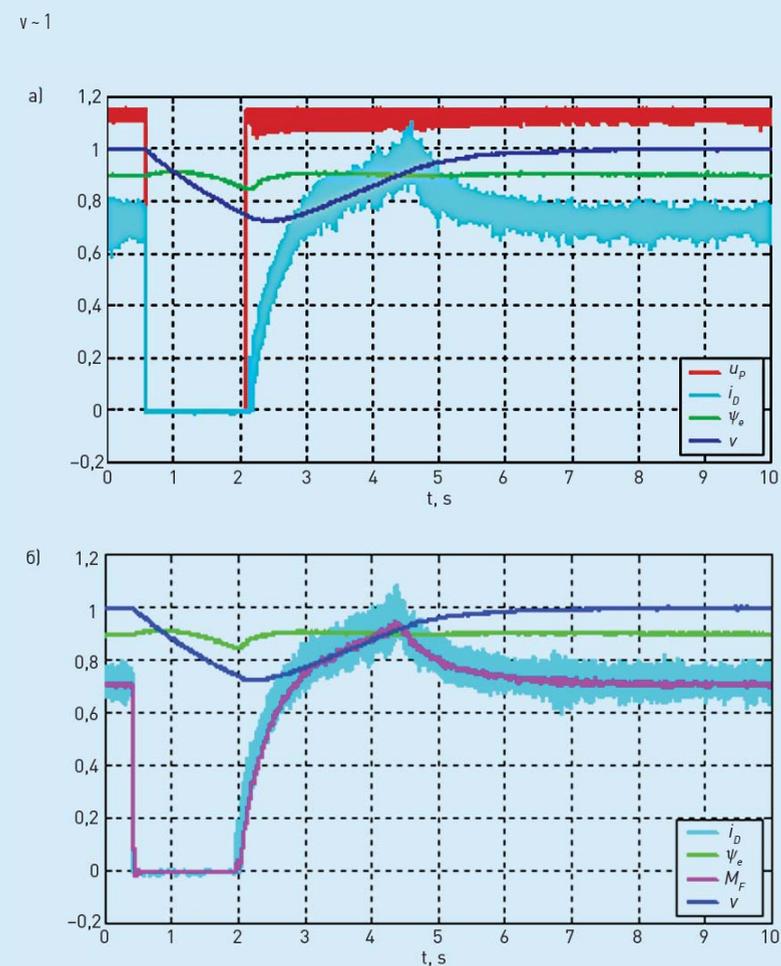


Рис. 11

На рис. 14 представлены расчетные характеристики коэффициентов гармоник напряжения на шинах узла нагрузки в ТОП подключения преобразователя частоты Power Flex 7000 с 18-пульсным тиристорным выпрямителем.

Характеристики были рассчитаны для наиболее мощного электропривода ГЦН-1 (5000 кВт, 6 кВ) и конкретных параметров рассматриваемого узла нагрузки. Представлены коэффициенты K_{U17} , K_{U19} , K_{U35} , K_{U37} для 17-й, 19-й, 35-й и 37-й гармоник

в функции отношения частоты вращения к ее номинальному значению. Пунктирными линиями соответствующего цвета показаны нормально допустимые значения для коэффициентов гармоник по ГОСТ, приведенные в табл. 2. Из рассмотрения показателей качества K_U и $K_{U(n)}$ и анализа результата расчетов коэффициента искажения синусоидальности напряжения $K_{U(n)}$ для преобразователя Power Flex 7000 с 18-пульсным выпрямителем следует, что применение в электроприводе ГЦН-1 и ГЦН-2 преобразователя частоты с 18-пульсным управляемым выпрямителем в принципе позволяет обеспечить ЭМС таких электроприводов с сетью 6 кВ СН энергоблока БН-800.

Автономный инвертор преобразователя частоты, являясь источником высших гармоник, влияет не только на потери в асинхронном двигателе и его допустимую нагрузку, но и на изоляцию статора. При выборе топологии инвертора необходимо учитывать амплитуду и крутизну коммутационных пиков в напряжении, прикладываемых к асинхронному двигателю между фазами обмотки статора и относительно земли [24]. Степень воздействий на изоляцию статора зависит от формы и крутизны (dU/dt) коммутационных пиков в выходном напряжении инвертора. При этом в зависимости от топологии схемы инвертора и формы напряжения могут возникать волновые процессы в соединительном кабеле между инвертором и двигателем, сопровождающиеся импульсными перенапряжениями с почти двукратной амплитудой, прикладываемыми к изоляции обмотки статора (проблема «длинного кабеля»). В преобразователях частоты с ШИМ-инвертором тока на полностью управляемых полупроводниковых вентилях (GTO, SGCT-тиристорах), таких как Power Flex 7000 минимизация искажений напряжения, прикладываемого к статору АД, обеспечивается специальным алгоритмом ШИМ.

ОСЦИЛЛОГРАММА УСПЕШНОГО САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЦН-1. ИСХОДНЫЙ РЕЖИМ — НАГРУЗКА ПРИ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ 250 МИН $^{-1}$

$v = 0,25$

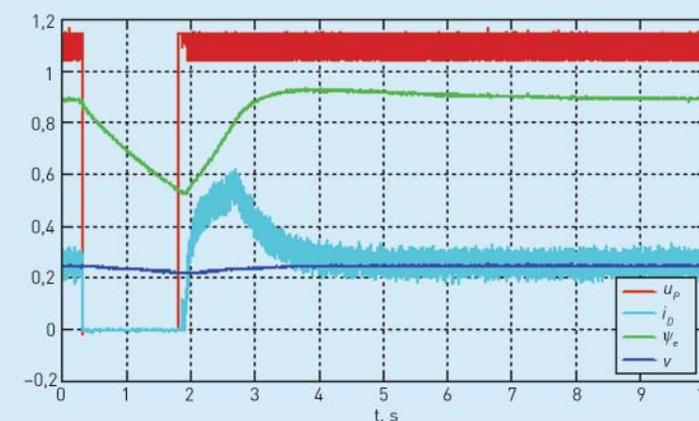


Рис. 12

НОРМАЛЬНО ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГАРМОНИК

n	5	7	11	13	17	19	23	25	> 25
$K_{U(n)}$	4	3	2	2	1,5	1	1	1	$0,2 + 0,8 \times 25/n$

Таблица 2

При этом выходное напряжение инвертора имеет форму, близкую к синусоидальной, и практически не содержит пиков [23, 24].

На осциллограмме на рис. 15 показаны формы тока и напряжения статора асинхронного двигателя ГЦН в установившемся режиме работы электропривода при номинальной частоте вращения. Высокочастотная составляющая ШИМ фильтруется конденсаторной батареей на выходе

инвертора (см. рис. 6). Низкочастотная составляющая тока проходит в обмотку статора двигателя. С учетом его фильтрующих свойств форма тока в фазах статора, как видно из рис. 15, близка к синусоидальной, а линейное напряжение достаточно гладкое и не содержит коммутационных пиков с большим значением dU/dt (значение $dU/dt < 10$ В/мкс). Коэффициент THD $< 3,5\%$.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПЛАВНОГО ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ РУ БН ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ГЦН

Применение для регулирования главных циркуляционных насосов электроприводов с плавно изменяемой частотой вращения обеспечивает АЭС целый ряд технических преимуществ. Для реакторов типа БН плавное регулирование частоты вращения ГЦН является обязательным, так как позволяет снизить тепловые нагрузки в технологическом оборудовании в основных и переходных режимах, обеспечивает более мягкое протекание аварийных режимов, исключает тепловые и гидравлические удары, способствует развитию естественной циркуляции теплоносителя при отключенных циркуляционных насосах [17].

Для определения технико-экономической эффективности применения регулируемого электропривода ГЦН необходимо, прежде всего, определить составляющие потерь, снижающие эксплуатационные издержки после введения регулируемого электропривода ГЦН взамен нерегулируемого. Очевидно, что при нерегулируемом электроприводе ГЦН с уменьшением нагрузки энергоблока эти издержки будут возрастать. Регулируемый электропривод ГЦН позволяет получать спецификационные параметры пара и за счет этого высокие

ОСЦИЛЛОГРАММА УСПЕШНОГО ПОДХВАТА ВЫБЕГАЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЦН-1 ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ POWER FLEX 7000L 657A, 6 KV

Обозначения:

i_D — ток в звене постоянного тока; v — скорость вращения электропривода; Speed Feedback — измеренная скорость вращения электродвигателя; Flux Feedback — измеренный поток в зазоре электродвигателя-1

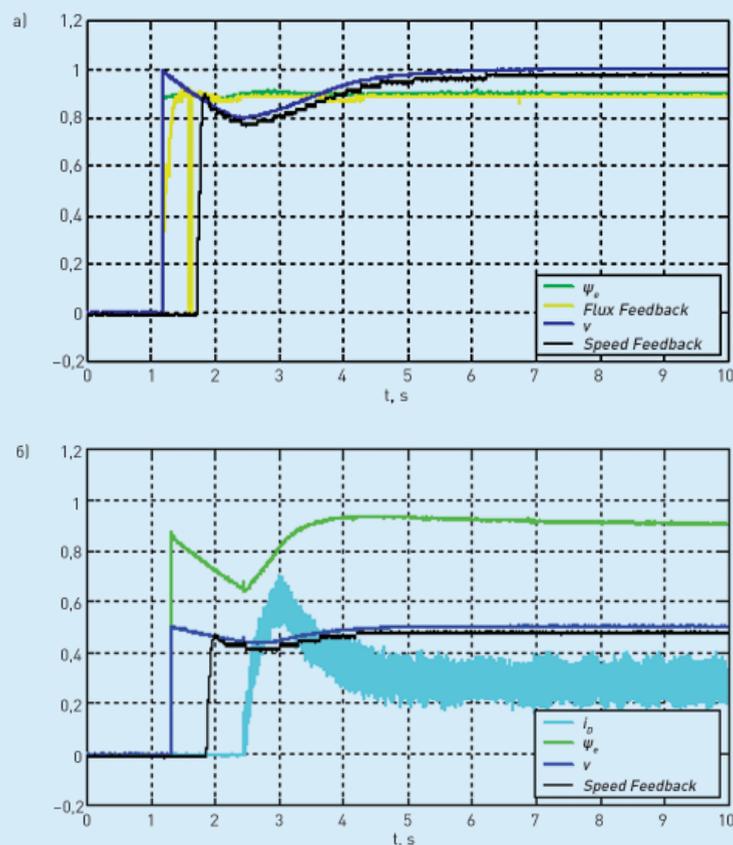


Рис. 13

энергетические характеристики турбин АЭС в режимах частичной мощности, останова и ремонтно-профилактических отключений теплотехнического и другого оборудования станции [24]. Высокие энергетические характеристики турбины обусловлены возможностью изменения расхода по кон-

турам прямо пропорционально изменению мощности реактора и, в среднем, мощности, вырабатываемой энергоблоком в целом.

Недоотпуск электроэнергии при нерегулируемом электроприводе ГЦН возникает за счет увеличения продолжительности пуска,

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ УЗЛА НАГРУЗКИ В ТОП ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ POWER FLEX 7000 С 18-ПУЛЬСНЫМ ТИРИСТОРНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ

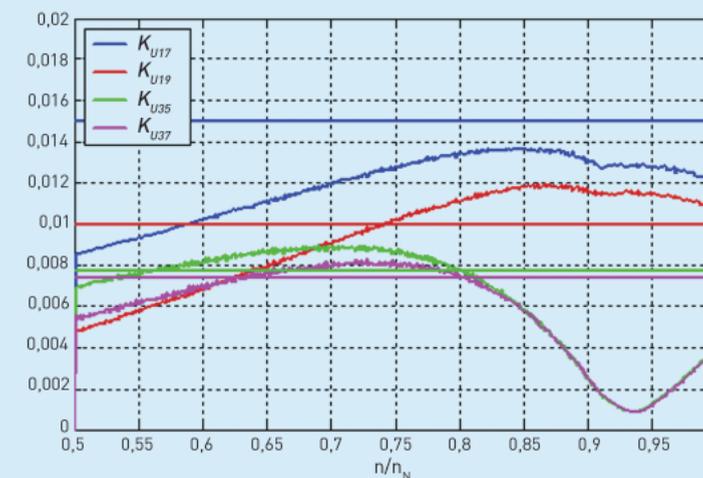


Рис. 14

останова АЭС и маневрирования энергоблока на частичных уровнях мощности.

Возможность снижения частоты вращения ГЦН при ее регулировании и, следовательно, потребляемой насосом мощности, благодаря его вентиляторной характеристике, также позволяет снизить уровень потерь в СН и повысить КПД энергоблока на частичных уровнях мощности АЭС. Так как мощность ГЦН АЭС, как уже отмечалось выше, составляет значительную долю среди потребителей СН, экономия электроэнергии может быть весьма существенной.

Работа энергоблока АЭС на частичной мощности при применении для ГЦН нерегулируемого электро-

привода сопровождается возникновением следующих потерь:

- дополнительные потери электроэнергии за счет снижения КПД термодинамического цикла турбоагрегата из-за снижения параметров пара турбины;
- дополнительные потери электроэнергии на собственные нужды АЭС за счет увеличенного потребления электроприводами насосов электроэнергии из сети.

Относительное снижение КПД термодинамического цикла турбины по отклонению параметров пара за счет увеличенного расхода

теплоносителя ГЦН 1 и 2 контуров можно определить как [17]:

$$\Delta\eta_T = \beta_t \Delta t + \beta_p \Delta H,$$

где Δt , ΔH — относительные отклонения параметров турбины (температура, давление) от номинальных;

β_t , β_p — эмпирические полиномы, связывающие абсолютные температуры и давление пара турбины с его КПД.

Относительное снижение КПД турбины $\Delta\eta_T$ растет с уменьшением загрузки энергоблока и может составить 3–5% от мощности $N_{ТГ}$ турбогенератора (ТГ) при минимальном использовании мощности ТГ станции (рис. 16а).

Разница мощности, потребляемой из сети СН нерегулируемым и регулируемым электроприводом ГЦН (рис. 16б), равна:

$$\Delta P_{ГЦН} = [1 - \omega^*]^3 P_{ГЦН},$$

где $P_{ГЦН}$ — суммарная мощность ГЦН АЭС;
 ω^* — относительная величина частоты вращения ГЦН, о.е.

Учитывая, что в период освоения энергоблока РУ БН он работает на частичных нагрузках достаточно длительный период времени ($t_{осв}$), разность расхода электроэнергии за период освоения (рис. 17) при использовании двух сравниваемых систем электропривода можно определить как:

$$\Delta W = \int_{t=0}^{t=t_{осв}} (\Delta P_{ГЦН} + \Delta N_{ТГ}) dt = \Delta W_{ГЦН} + \Delta W_{ТГ}$$

При оценке приняты допущения, что график освоения мощности энергоблока $N/N_N = f(t)$ является равномерным, а зависимость линейной. График изменения частоты вращения регулируемого

электропривода в период набора мощности АЭС также представляется линейной зависимостью от времени, имеющей вид:

$$\omega_*(t) = \omega_{*min} + (\omega_{*ном} - \omega_{*min})t / t_{осв}$$

где $\omega_{*ном}$ и ω_{*min} — относительные значения частоты вращения ГЦН, соответствующие номинальной и минимальной мощностям реактора.

На основании принятых допущений с учетом приведенных выше соотношений при $\omega_{*min} = 0,2$ получены выражения для определения составляющих экономии электроэнергии $\Delta W_{тг}$ и $\Delta W_{гцн}$ за период освоения блока:

$$\Delta W_{тг} = 0,4N_{тг}\Delta\eta_{тг}t_{осв}; \Delta W_{гцн} = 0,69P_{гцн}t_{осв}$$

Наиболее частым видом аварии РУ является отключение одной петли теплообмена при неисправности электропривода ГЦН. При этом реакторная установка переходит в режим работы с пониженным уровнем мощности в течение времени восстановления ($t_{в}$) i -го элемента электропривода. Затем происходит расхолаживание РУ ($t_{ост}$) с последующим ее выводом на необходимую мощность с введенной из ремонта петель ($t_{пуск}$). Так как расхолаживание и вывод реакторной установки на мощность происходит со скоростями нормального маневрирования ее нагрузкой, общее время и величина недоотпуска электроэнергии являются значительными.

Величину недоотпуска электроэнергии при аварии типа «отключение петли» теплообмена РУ можно приближенно оценить из графического построения на рис. 18 по соотношению:

$$\Delta W = N_H \left[\frac{t_{вi}}{m_T} + \frac{t_{ост}(m_T + 1)}{2m_T} + \frac{t_{пуск}}{2} \right]$$

ФОРМЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ (В СТАТОРЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГЦН-1) В НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ

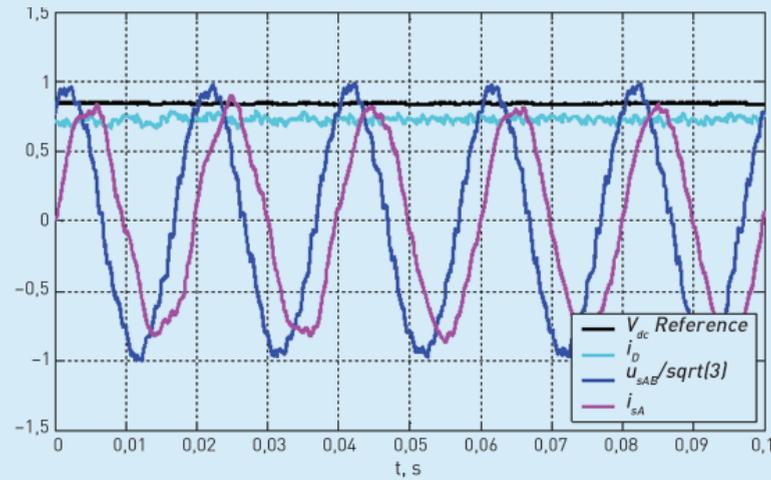


Рис. 15

КПД ТУРБОАГРЕГАТА: (А) КПД И РАЗНОСТЬ ПОТРЕБЛЯЕМЫХ МОЩНОСТЕЙ ГЦН; (Б) КПД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАГРУЗКИ ЭНЕРГБЛОКА

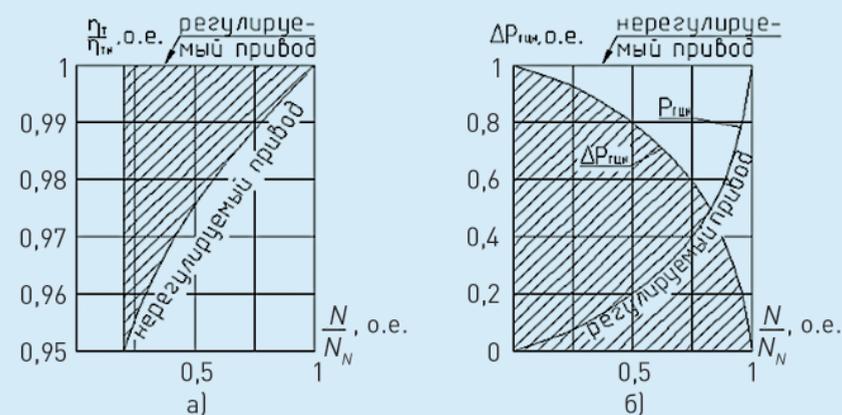


Рис. 16

ТИПОВОЙ ГРАФИК ОСВОЕНИЯ ЭНЕРГБЛОКА РУ БН АЭС

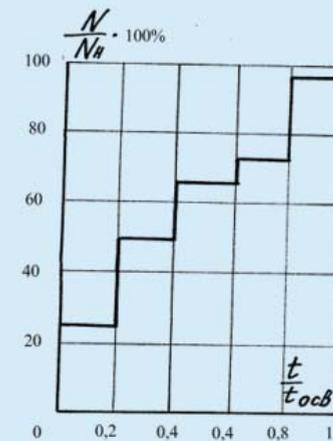


Рис. 17

где m_T — число петель теплообмена;

$t_{вi}$, $t_{ост}$, $t_{пуск}$ — времена восстановления (ремонта i -го оборудования), снижения и вывода энергоблока на заданную мощность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для реакторов на быстрых нейтронах управление ГЦН с применением частотно-регулируемых электроприводов для изменения расхода теплоносителя в эксплуатационных режимах энергоблоков АЭС является обязательным, так как позволяет снизить тепловые нагрузки в технологическом оборудовании в основных и переходных

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕДОТПУСКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ЭНЕРГБЛОКОМ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ПЕТЛИ ТЕПЛООБМЕНА (T=0)

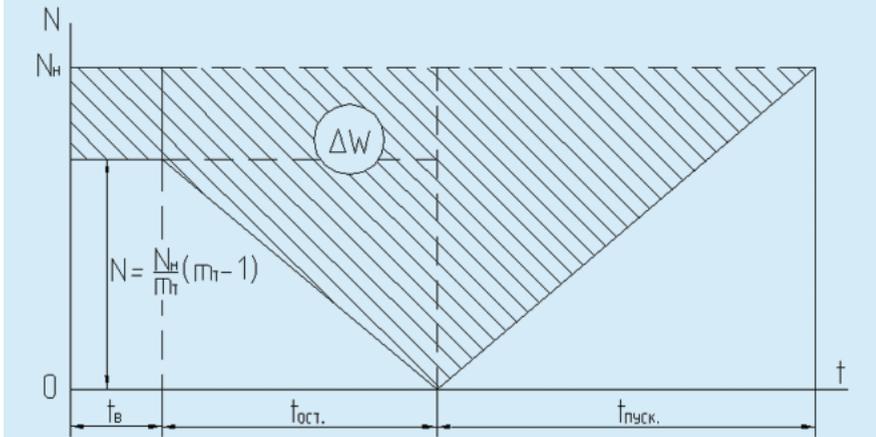


Рис. 18

режимах, обеспечивает более мягкое протекание аварийных режимов, исключает тепловые и гидравлические удары, способствует развитию естественной циркуляции теплоносителя при отключенных циркуляционных насосах.

2. Плавное изменение расхода теплоносителя по контурам РУ, прямо пропорциональное изменению нагрузки реактора, обуславливает высокие энергетические характеристики турбоагрегата.
3. Частотное регулирование ГЦН при маневрировании нагрузкой РУ позволяет снизить уровень потерь электроэнергии в СН и повысить КПД энергоблока в целом. Так

как мощность ГЦН АЭС составляет значительную долю общей мощности потребителей СН энергоблока, экономия электроэнергии при частотном регулировании ГЦН является весьма существенной.

4. Для повышения эксплуатационной надежности и безопасности работы энергоблока, исключение режимов с отключением петли теплообмена в главных контурах РУ БН система управления частотой вращения ГЦН с применением преобразователей частоты должна быть выполнена с резервированием.
5. Учитывая значительные мощности приводных электродвигателей ГЦН, для их регулирования

должны применяться преобразователи частоты среднего напряжения, в качестве которых можно рекомендовать преобразователи по топологии автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией, обеспечивающей близкие к синусоидальной формы тока и напряжения асинхронного двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

- Ушаков В.Я. Основные проблемы энергетики и возможные способы их решения // Известия Томского политехнического университета. Т. 319. 2011. № 4.
- Онищенко Г.Б., Лазарев Г.Б. Развитие энергетики России. Направления инновационно-технологического развития. М.: «Россельхозакадемия», 2008.
- Государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года». Утв. распоряжением Правительства РФ № 2446-р от 27.12.2010.
- Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». Утв. постановлением Правительства РФ от 15.04.2014 № 321.
- «О централизации работ по энергосбережению и повышению энергетической эффективности атомной отрасли». Приказ Госкорпорации «Росэнергоатом» от 26.12.2010 №1/62-П.
- Государственная программа РФ «Развитие атомного энергетического комплекса». Утв. постановлением Правительства РФ от 02.06.2014 № 506-12.
- Зверев Д.Л., Васильев Б.А., Седаков В.Ю., Кузавков Н.Г. Реакторы на быстрых нейтронах: от БР-5 к БН-1200 // Доклад на международной научно-технической конференции «БН-600 — 30 лет». 2010.
- Васильев Б.А. Реактор на быстрых нейтронах БН-1200 // В сб. докладов третьего международного форума поставщиков атомной отрасли «Атомлекс 2011». М., 2011.
- Анишев Е.Ю., Лазарев Г.Б., Султанов А.Т. Особенности применения асинхронного частотно-регулируемого электропривода циркуляционных насосов энергетической установки специального назначения. // Вестник ВНИИЭ-2003. М.: ЭНАС, 2003.
- Васильев Б.А. Оценка эффективности конструкторских решений быстрых натриевых реакторов и их развитие в новых проектах // В сб. докладов международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». МНТК-2010.
- Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- Онищенко Г.Б., Пономарев В.М., Анишев Е.Ю. и др. Регулируемый электропривод главных циркуляционных насосов III блока Белоярской АЭС // Электрические станции. 1982. № 6.
- Черемисин В.В., Шилов Е.А., Анишев Е.Ю. Опыт эксплуатации регулируемых электроприводов главных циркуляционных насосов реактора БН-600 // Электрические станции. 2005. № 5.
- Митенков Ф.М., Новинский Э.Г., Будов В.М. Главные циркуляционные насосы АЭС. М.: Энергоиздат, 1984.
- Анишев Е.Ю., Лазарев Г.Б. Особенности применения преобразователей частоты в мощном электроприводе циркуляционных насосов // Электротехника. 2007. № 10.
- Анишев Е.Ю., Бабушкин С.В. Комплексные регулируемые электроприводы главных циркуляционных насосов АЭС типа БН // В сб. докладов на международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М.: МНТК-2010.
- Анишев Е.Ю. Техничко-экономическое обоснование внедрения регулируемых электроприводов циркуляционных

- насосов атомных электростанций // Приводная техника. 2010. № 3.
- Лазарев Г.Б. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода // Новости электротехники. 2005. № 2 (32).
- Лазарев Г.Б. Мощные высоковольтные преобразователи частоты для регулируемого электропривода в электроэнергетике // Электротехника. 2005. № 11.
- Лазарев Г.Б. Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок — эффективная технология энерго- и ресурсосбережения на тепловых электростанциях // Силовая электроника. 2007. № 3.
- Лазарев Г.Б., Новаковский А.Н., Султанов А.Т. Система частотно-регулируемых электроприводов циркуляционных насосов энергообъекта // Патент РФ на полезную модель. № 120521. Зарегистрирован в Госреестре полезных моделей РФ 20.09.2012.
- Лазарев Г.Б., Новаковский А.Н., Султанов А.Т. Способ резервирования преобразователей частоты в системе электроприводов циркуляционных насосов энергообъекта // Патент РФ RU № 2496209 С1. Бюллетень изобретений. 2013. № 29.
- Лазарев Г.Б. Обеспечение электромагнитной совместимости при применении частотно-регулируемых асинхронных электроприводов в системах электропитания собственных нужд ТЭС // Вестник ВНИИЭ-2000. М.: ЭНАС, 2000.
- Лазарев Г.Б. Электромагнитная совместимость высоковольтных преобразователей частоты с системами электропитания и электродвигателями собственных нужд тепловых электростанций // Электротехника. 2004. № 10.
- Анишев Е.Ю., Дмитриев С.М. Крутильные деформации валопроводов главных циркуляционных насосов АЭС с частотно-регулируемым электроприводом // Приводная техника. 2011. № 4.
- Али Башарат, Лошаков И.И. Регулирование энергоблоков АЭС с ВВЭР при изменении производительности ГЦН // Ядерная энергетика. 2002. № 1.

НОВИНКА КАМСКОГО КАБЕЛЯ — КАБЕЛИ СИЛОВЫЕ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СПЭ С СЕКТОРНЫМИ ЖИЛАМИ

На правах рекламы

Камский кабель в 2015 году начинает выпуск новой продукции — силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с токопроводящими жилами секторной формы на среднее напряжение 6, 10, 15, 20 кВ.



Рис. 1

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена с круглой формой жил начали применяться за рубежом с 70-х годов прошлого столетия. В России кабели из СПЭ стали активно замещать кабели с БПИ, начиная с 2004 года. Привыкшим к традиционной секторной форме жил кабеля с БПИ, монтажникам и энергетикам пришлось приспособиться к новой конструкции, несмотря на все преимущества кабелей с изоляцией из СПЭ. С появлением легкоотделяемого полупроводящего материала в России (данный материал облегчает разделку жил трехжильного кабеля при монтаже муфт), стало возможным изготовление кабелей с секторной формой жил с изоляцией из СПЭ. В 2013–2014 годах технические специалисты ООО «Камский кабель» проводили работы по разработке и освоению кабелей из СПЭ с токопроводящими жилами секторной формы на среднее напряжение 6, 10, 15,

20 кВ. В 2015 году данная новинка Камского кабеля появилась на рынке России.

В сравнении с кабелем с круглыми жилами новинка имеет ряд несомненных преимуществ. Сфера применения и длительная допустимая токовая нагрузка кабелей с СПЭ-изоляцией с секторными жилами аналогична традиционной конструкции, при этом значительно снижена масса и уменьшены габаритные размеры кабеля. За счет этого увеличена максимальная длина его намотки на барабан, благодаря этому снижаются транспортные и складские расходы, при прокладке требуется меньшее количество соединительных муфт. Минимизированы дополнительные затраты на эксплуатацию за счет наличия в конструкции общего экрана, благодаря ему потери в металлическом экране приближены к нулю. Новый кабель легче разделяется за счет отсутствия экструдированного за-

полнения межжильного пространства и благодаря легкоотделяемому полупроводящему слою по изоляции. В процессе разделки кабеля для монтажа арматуры не требуется специальный инструмент, меньше риск повредить изоляцию при зачистке.

Массо-габаритные показатели позволяют монтировать секторный кабель с меньшим радиусом изгиба, прикладывая меньше усилий при протягивании его через трубы. Несомненным плюсом в глазах потребителей является и более низкая стоимость изделия — ниже на 20%.

Все эти преимущества снижают затраты на строительство и эксплуатацию кабельных линий, что в итоге позволяет экономить на стоимости всей инфраструктуры объекта.

ООО «Камский кабель» занимает порядка 20 % рынка силовых кабелей в нашей стране и входит в рейтинг аттестованных поставщиков продукции для компании «Россети».



ООО «Камский кабель»
г. Пермь, Гайвинская ул., 105
8-800-220-5000 — единая справочная служба, для абонентов РФ звонок бесплатный
e-mail: zakaz@kamkabel.ru
www.kamkabel.ru