

3. РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ МАШИН ПЕРЕГРУЗКИ ТОПЛИВА

*Канд. техн. наук Г.А. Жемчугов, инж. А.Н. Казачков,
канд. техн. наук Ю.Т. Портной, инж. М.А. Смирнитский*

НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ МАШИН АЭС С РЕАКТОРАМИ ТИПА ВВЭР-1000

Перегрузку ядерного топлива реакторов типа ВВЭР, технология которых достаточно подробно описана в [1], осуществляет дистанционно управляемый робот-манипулятор, называемый машиной перегрузочной (МП).

Разработку и изготовление первых двух типов МП для реакторов ВВЭР-1000 (МП-1000 и МП-1000-2) осуществило производственное объединение "Уралмашзавод", третьего типа (МП-1000-3) – производственное объединение "Атоммаш". Системы управления перегрузочных машин (СУМП) для трех указанных типов машин (СУМП-1000, СУМП-1000-2, СУМП-1000-3) были разработаны в НПП ВНИИЭМ¹.

В течение длительного периода – более 20 лет – эти системы управления успешно эксплуатируются на 5-м энергоблоке Нововоронежской АЭС, 1-2-м энергоблоках Калининской и Южно-Украинской АЭС, 1-4-м энергоблоках Запорожской АЭС. Основные особенности СУМП-1000-3 для 1-4 энергоблоков Запорожской АЭС отражены в [2, 3].

В связи с тем, что разработанные в начале 80-х годов XX века СУМП в настоящее время в значительной степени не отвечают современным требованиям ядерной безопасности (ОПБ-88/97, ПБЯ РУАС-89, ПБХ и Т ЯТ-91, НП-031-01), концерном "Росэнергоатом" была разработана концепция модернизации МП для энергоблоков АЭС с ВВЭР, предусматривающая замену действующих систем управления СУМП на вновь разработанные, отвечающие совре-

¹ Под научно-техническим руководством НПП ВНИИЭМ производственное объединение "Средаэлектроаппарат" (г. Ташкент) разработало и изготовило ряд систем управления по типу СУМП-1000-3 для Балаковской и ряда других АЭС с реактором ВВЭР-1000.

менным требованиям ядерной безопасности и имеющие соответствующие технические характеристики. Основные принципы, положенные в основу СУМП, предназначенных как для замены при модернизации МП на действующих энергоблоках, так и для вновь разрабатываемых МП строящихся энергоблоков, изложены в [4].

Из основных структурных и технических решений, положенных в основу указанных систем управления и изложенных в [4], следует, что СУМП делится на две основные, отличные друг от друга по функциональному назначению и техническим средствам составные части:

- комплекс электрооборудования (КЭ), включающий в себя систему электропитания и электроприводы механизмов МП;
- управляющий вычислительный комплекс (УВК), состоящий из программно-технических средств и пульта дистанционного управления оператора МП.

НПП ВНИИЭМ разработал новое поколение КЭ СУМП, составными частями которого являются распределительное устройство электропитания (РУП) и комплектный электропривод (КЭП).

РУП обеспечивает требуемое электропитание различных потребителей МП (приводов, электромагнитов внешних и встроенных в электродвигатели тормозных устройств и сейсмотормозов, датчиков, сигнальных устройств, УВК), КЭП обеспечивает управляемые перемещения основных механизмов МП.

Распределительное устройство электропитания выполнено с автоматическим включением резерва (АВР) с учетом принципа двухканального построения системы управления МП.

КЭП содержит регулируемые бездатчиковые асинхронные электроприводы, построенные на базе преобразователей частоты, и нерегулируемые - на базе реверсивных контакторов.

Регулируемыми электроприводами (КРЭП) оснащены приводы механизмов перемещения моста, тележки, подрыва, захвата ТВС, захвата кластера, телевизионной штанги, поворота рабочей штанги. Нерегулируемыми электроприводами (КНЭП) оснащены механизмы привода фиксатора захвата ТВС и поворота обоймы телештанги.

Для обеспечения работы МП в режиме нормальной эксплуатации при перегрузке топлива и при хранении в нормальных и аварийных режимах под гермооболочкой (ГО) реакторного зала, характеризующимися радиоактивностью, агрессивной средой, повышенными давлением, влажностью и температурой, НПП ВНИИЭМ разработал серию специальных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей типа АДА [5], входящих в КЭ МП, которые соответствуют требованиям окружающей среды под ГО.

Наружные поверхности электродвигателей устойчивы к дезактивирующим растворам.

Электродвигатели снабжены встроенным тормозом, обмоткой контроля температуры и допускают установку ручных приводов.

Встроенные тормоза обладают высоким быстродействием, что обеспечивает четкую, без задержки остановку механизмов МП по команде от УВК и, как следствие, способствуют высокой точности позиционирования механизмов.

Двигатели рассчитаны на полную реализацию картограммы перегрузки топлива, реализуя требуемые циклограммы работы регулируемых электроприводов механизмов МП в режимах S8 по ГОСТ 183, и имеют исполнение, обеспечивающее работу при питании от преобразователей частоты.

Необходимо отметить, что в настоящее время отсутствуют аналоги разработанным двигателям, а двигатели, выпускаемые для АЭС рядом зарубежных фирм (ХЭМЗ, Сименс), являются образцами общепромышленных серий.

Разработка нового поколения КЭ выполнена на базе следующих основных положений:

- МП работоспособна только при исправности приводов всех механизмов;
- неисправность любого привода приводит к необходимости остановки МП, проведению соответствующих ремонтных работ и последующему восстановлению работоспособности всех приводов и МП в целом.

Из общего состава механизмов с регулируемой скоростью перемещения одновременно могут быть использованы только:

- механизмы перемещения моста и тележки;
- механизмы перемещения захвата ТВС и телевизионной штанги.

Остальные механизмы в соответствии с конструктивными особенностями МП могут работать только индивидуально, когда другие механизмы остановлены.

Возможность одновременного перемещения моста, тележки, захвата ТВС и телевизионной штанги в соответствующие технологические периоды перегрузки позволяет сократить время перегрузки и должна быть обязательно обеспечена структурой комплектных приводов.

Таким образом, комплектные регулируемые электроприводы разделяются на две группы, обеспечивающие необходимые индивидуальные и совместные перемещения механизмов.

КРЭП 1:

- перемещение моста (или тележки);
- перемещение захвата ТВС;
- перемещение механизма подрыва.

КРЭП 2:

- перемещение тележки (или моста);
- перемещение захвата кластера;
- перемещение телевизионной штанги;
- поворот рабочей штанги.

Электропривода с нерегулируемой скоростью перемещения (перемещение фиксатора захвата ТВС и поворота телевизионной штанги) объединяются в отдельную группу (КНЭП).

Деление механизмов с регулируемой скоростью перемещения на две указанные группы позволяет использовать в КЭ только два преобразователя частоты, обеспечивающих питание электродвигателей приводов соответствующих механизмов, что повышает надежность КЭ и снижает трудозатраты при эксплуатации.

Электродвигатели приводов, входящих в состав КРЭП1 и КРЭП2, подключаются к соответствующему преобразователю частоты коммутационными аппаратами (контактными или бесконтактными), управляемыми контроллерами преобразователей частоты в соответствии с формируемыми УВК СУМП режимами работы приводов СУМП.

В СУМП, имеющей двухканальную структуру, перемещение механизма обеспечивается при совпадении решений обоих каналов управления (два из двух), а останов механизмов – по решению одного (любого) канала управления (каждый из двух).

Управляющие сигналы, вырабатываемые УВК и поступающие на входы КЭП, проверяются на достоверность и реализуются комплектными электроприводами (КРЭП1, КРЭП2, КНЭП).

В каждом комплектном электроприводе предусмотрены два микропроцессорных контроллера (одинаковых в процессорной части), один из которых – контроллер «рабочий» (РК), второй – контроллер «диагностический» (ДК). На управляющие входы контроллеров РК и ДК от УВК поступают одинаковые управляющие сигналы, рабочий контроллер формирует режимы работы привода, задаваемые управляющими сигналами, диагностический контроллер определяет соответствие режима работы привода, установленного рабочим контроллером, заданному управляющими сигналами.

При соответствии режима работы привода, установленного рабочим контроллером, режиму, определенному диагностическим контроллером по поступившим управляющим сигналам, установ-

ленный режим работы привода считается соответствующим заданному и действие привода разрешается.

При несовпадении режима работы привода, устанавливаемого РК, и режима работы, определенного ДК, действие привода считается не соответствующим заданному и функционирование привода запрещается.

Использованное построение формирования режимов работы КЭП отвечает принципу двухканальности СУМП: два из двух на перемещение и каждый из двух на останов.

Двухканальное формирование режимов работы приводов требует повышения надежности передачи управляющих сигналов и эффективной защиты от искажения управляющей информации.

Управление КРЭП и КНЭП осуществляется комбинацией управляющих сигналов, определяющей подключаемый к преобразователю частоты двигатель привода механизма, скорость и направление перемещения, начало и конец движения. Предусмотрены специальный сигнал чётности и комплементарный принцип переключения управляющих сигналов «разрешение движения» и «направление движения» - они должны изменяться в противофазе, осуществляя дифференциальный принцип управления.

Управление осуществляется в реальном времени, причем механизм перемещается, когда управляющий сигнал «разрешение движения», соответствующий ему комплементарный сигнал и остальные управляющие сигналы, включая контрольный сигнал «чётности», составляют корректное управляющее слово.

При нечетком действии комплементарных управляющих сигналов, задании невыполнимого режима работы, несовпадении состава управляющего слова с контрольным сигналом определяется неисправность системы и перемещение механизма блокируется.

В этом реализована «двухканальность» в формировании управляющих сигналов «два из двух» на движение и «каждый из двух» на останов.

В отличие от предыдущих исполнений МП, в новом поколении перегрузочной машины в приводах механизмов вертикального перемещения использованы червячные редукторы с самоторможением. Использование червячных редукторов с самоторможением исключает самопроизвольное перемещение механизмов вертикального перемещения вниз при отключении напряжения питания указанных приводов, чем обеспечивается повышение безопасности и надежности МП.

Вместе с тем червячные редукторы с самоторможением имеют значительно меньшие, по сравнению с цилиндрическими редукторами, значения КПД, что особенно актуально при низкой частоте вращения:

0,6÷0,65 при частотах вращения двигателя 1300÷1500 об/мин,
0,25÷0,3 при частотах вращения двигателя 50÷70 об/мин.

Такое снижение КПД редуктора при использовании самовентиляции двигателя приводит к значительному увеличению установленной мощности двигателей приводов механизмов перемещения захватов ТВС (11кВт) и кластера (0,55кВт).

Электродвигатели приводов механизмов перемещения моста, тележки, захвата ТВС, захвата кластера, телевизионной штанги и поворота рабочей штанги работают в перемежающемся режиме S8 с переменной (часто длительно низкой) частотой вращения и различными (часто более номинального) моментами нагрузки на валу, которым соответствуют значительные токи статора и греющие потери двигателя.

При малых частотах вращения (несколько десятков оборотов в минуту) самовентиляция двигателя неэффективна и охлаждение двигателя потоками воздуха не производится, что вызывает ускоренный нагрев двигателя.

Наиболее напряженные режимы работы, определяемые технологией перегрузки топлива, имеет привод механизма перемещения захвата ТВС.

На рис. 1 приведена типовая циклограмма работы привода захвата ТВС блока ВВЭР-1000, на циклограмме указаны моменты, которые должны быть развиты двигателем, скорости перемещения ТВС и время существования режимов.

Выбор двигателя проводится таким образом, чтобы обеспечивались необходимые вращающие моменты при температуре обмотки статора, не превышающей допустимой, при использовании самовентиляции двигателя.

На основании расчетов теплового состояния ряда асинхронных электродвигателей с параметрами, аналогичными двигателям серии 4А, для привода захвата ТВС был выбран электродвигатель АДА 132М4 мощностью 11кВт с самовентиляцией и изоляцией класса Н (предельное превышение температуры обмотки статора в соответствии с техническими условиями на двигатели серии АДА не должно быть больше 125°С).

Тепловое состояние выбранного двигателя в режимах, предусмотренных указанной циклограммой, определялось с использованием системы уравнений тепловой модели указанного двигателя, приведенной в Приложении. Результаты тепловых расчетов, приведенные на рис. 2, показывают, что двигатель АДА 132М4 обеспечивает формирование необходимых вращающих моментов на валу в режимах заданной циклограммы при умеренных температурах перегрева обмотки статора.

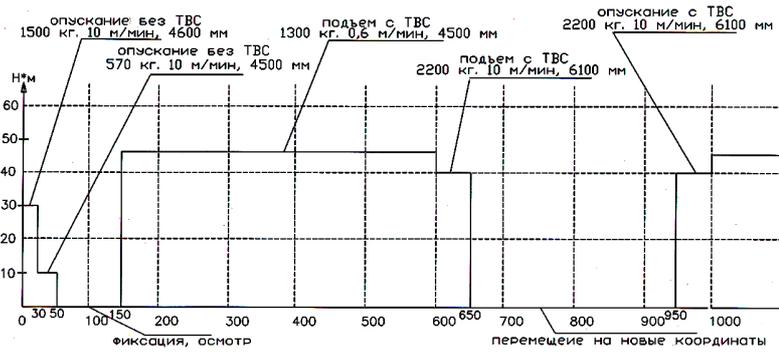


Рис. 1. Циклограмма перестановки

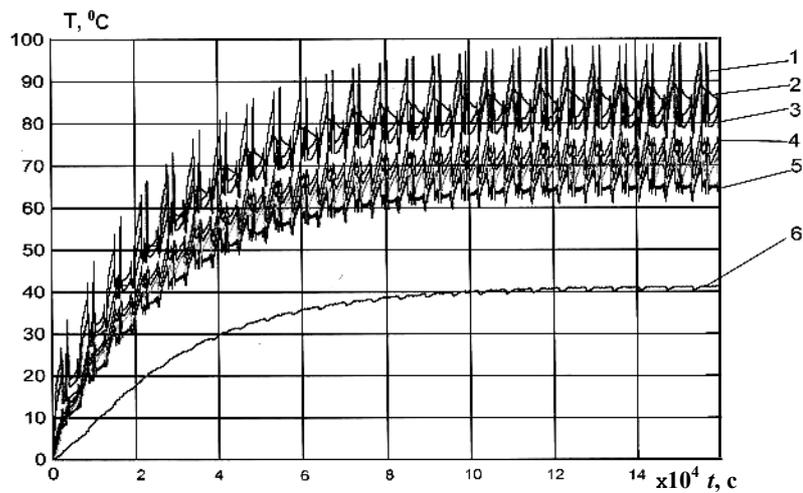
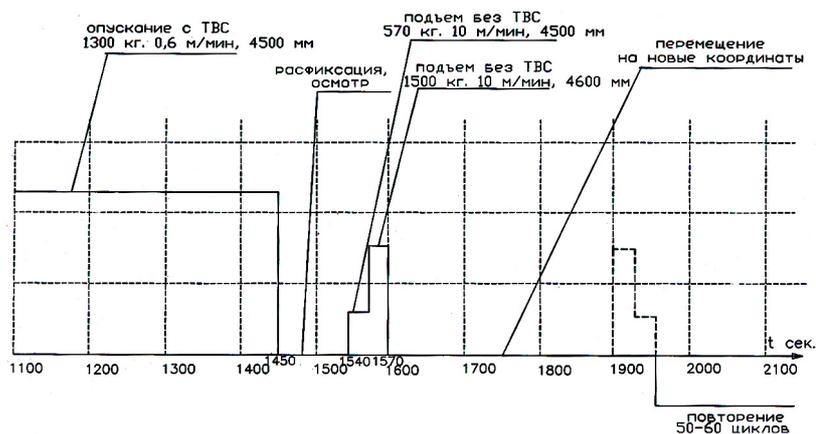


Рис. 2. Тепловые процессы двигателя АДА 132 М4:
 1 - температура лобовых частей обмотки статора; 2 - температура ротора с валом; 3 - температура пазовых частей обмотки статора; 4 - температура воздуха в пазах лобовых частей; 5 - температура станины с ребрами; 6 - температура подшипниковых щитов



ТВС в реакторе

Реальное превышение температуры обмотки статора бездатчикового асинхронного двигателя привода механизма перемещения захвата ТВС, измеренное при загрузке топлива на третьем энергоблоке Калининской АЭС, оказалось близким к расчетному и не превысило допустимых значений.

Функциональная схема комплектного многодвигательного электропривода нового поколения КЭ приведена на рис. 3.

Питание электродвигателей М1...М3 механизмов осуществляется преобразователем частоты, выполненным по принципам автономного инвертора напряжения с промежуточным звеном постоянного тока.

В качестве ключевых элементов используются IGBT транзисторы в модульном исполнении. В качестве выпрямителя используется диодная матрица в модульном исполнении.

Выпрямительный и транзисторный модули расположены на одном радиаторе с естественным воздушным охлаждением. Охладитель выбран таким образом, чтобы установившаяся температура оснований транзисторного и выпрямительного модулей при нагрузках, соответствующих циклограмме на рис. 1, не превышала 85°C.

В преобразователях чистоты использованы элементы, указанные в табл. 1.

Таблица 1

Наименование	Обозначение	Фирма
Транзисторный модуль	SKM75 GD124D 75A, 1200B	Semikron
Диодный модуль	SKD100 GAL123D 100A, 1200B	Semikron
Конденсаторы звена постоянного тока	B43458-A93338-M 3300мГ, 400В три конденсатора последовательно, два параллельно	EPCOS
Охладитель	P38/400	Semikron
Драйвер	SKHI71	Semikron

Двигатели подключаются к преобразователю контакторами, управляемыми контроллером преобразователя в соответствии с управляющими сигналами, задающими режимы работы привода. Напряжение питания двигателей формируется широтно-импульсной синусоидальной симметрированной модуляцией.

В КРЭП применяется система регулирования электропривода без датчика частоты вращения двигателя, которая поддерживает постоянство основного магнитного потока в зазоре двигателя с компенсацией скольжения ротора в функции токов статора.

Система регулирования и система управления КРЭП в целом базируются на процессорах типа i80ХС196МН фирмы Intel.

Система функционирует следующим образом (см. рис. 3).

В соответствии с поступающими от УВК управляющими сигналами блок «Задание режима КЭП» формирует управляющие сигналы для контакторов подключения двигателей и вырабатывает задание частоты вращения вала двигателя.

«Задатчик интенсивности», основываясь на задании частоты вращения, формирует медленно изменяющийся сигнал текущей частоты вращения, соответствующий установленным ускорениям (замедлениям механизма).

Сигнал текущей частоты вращения суммируется с рассчитанной поправкой на скольжение и поступает на вход определителя фазы ϕ и определителя задания ЭДС двигателя К1.

Определитель фазы рассчитывает текущую фазу формируемого напряжения для первой из фаз. Для обеспечения корректности расчётов значение фазы корректируется в соответствии с размером таблицы функции SIN, используемой впоследствии при формиро-

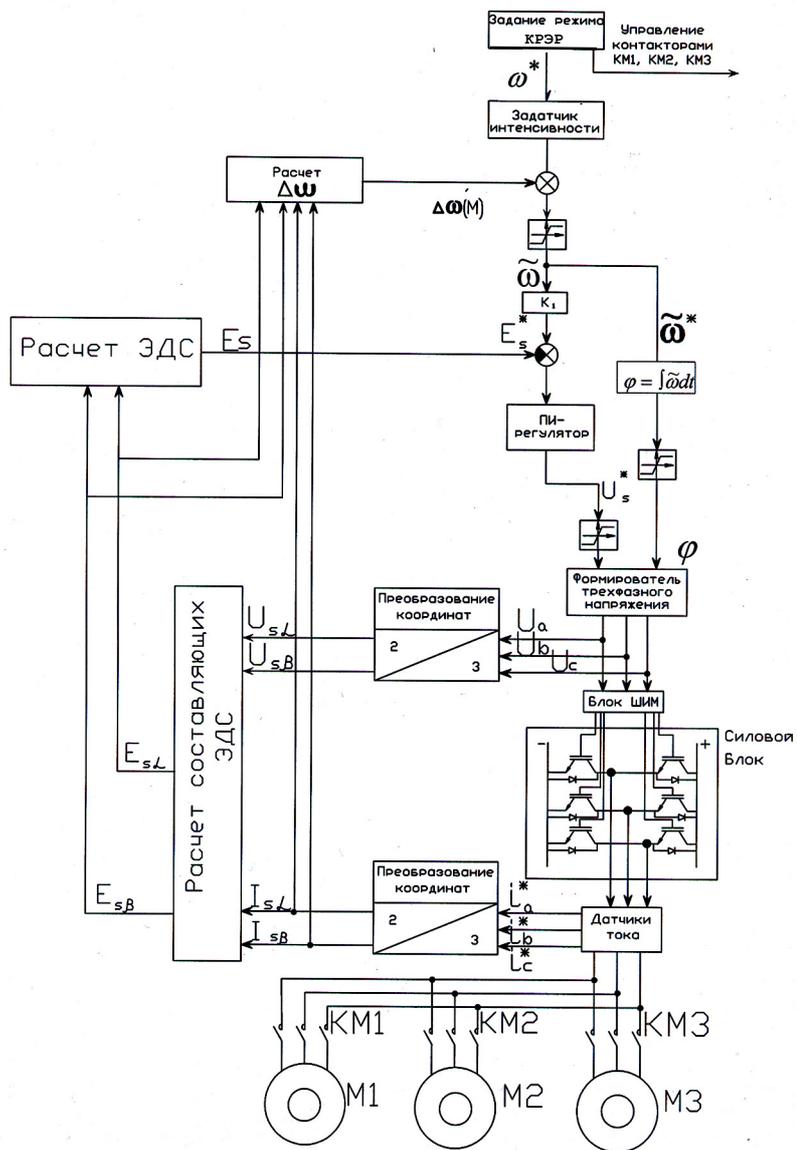


Рис. 3. Структура КРЭП

вании трехфазного напряжения. При этом возможно ограничение на уровнях от 0 до 2π , и от 0 до $\pi/2$ с поквadrантным пересчётом значений.

Определитель задания К1 реализует линейную зависимость ЭДС двигателя от частоты в диапазоне 4-50 Гц с дополнительным подъёмом при частотах менее 4 Гц. Характеристика задания ЭДС двигателя приведена на рис. 4.

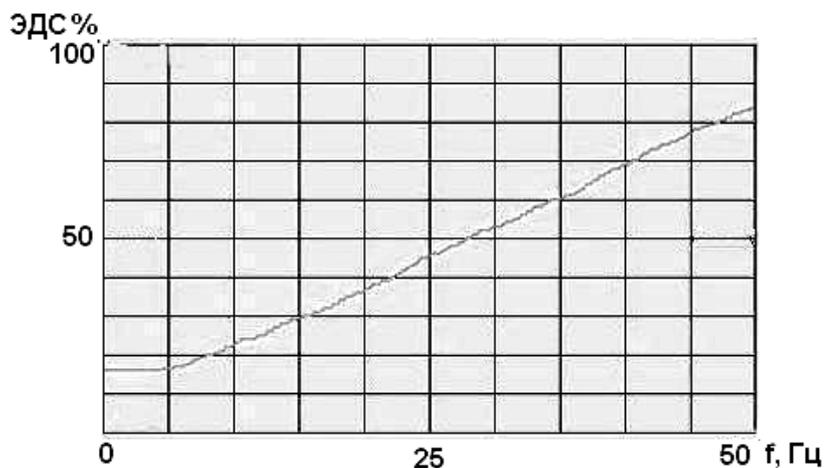


Рис. 4. Характеристика задания ЭДС двигателя

При этом поток определяется по наведенной ЭДС, рассчитываемой по паспортным параметрам двигателей, и измеренным значениям токов статора, определенным по устанавливаемым скважностям напряжения на фазах статора и задаваемой частоте напряжения питания двигателя.

Расчеты проводятся в следующей последовательности:

измеряются значения $i_a, i_b, i_c, u_a, u_b, u_c$;

определяются α и β составляющие:

$$I_\alpha = i_a; I_\beta = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}}; \quad U_\alpha = U_a; U_\beta = \frac{U_b - U_c}{\sqrt{3}};$$

определяются значения токов и напряжений фазы статора

$$I_s = \sqrt{I_\alpha^2 + I_\beta^2}; U_s = \sqrt{U_\alpha^2 + U_\beta^2};$$

определяются α и β составляющие ЭДС

$$Em\alpha = U\alpha - I\alpha R_1 + I\beta x_1;$$

$$Em\beta = U\beta - I\beta R_1 + I\alpha x_1;$$

определяется значение фазной ЭДС статора

$$Em = \sqrt{Em\alpha^2 + Em\beta^2}.$$

Разность между заданным и текущим значениями поступает на вход ПИ-регулятора, который вырабатывает регулирующее воздействие:

$$S_i = S_{i-1} + K_{pp} \left[e_i - e_{i-1} + e_{i-1} \frac{\Delta t_{расч.}}{\tau_{рег}} \right],$$

поступающее на формирователь трехфазного напряжения, задающий требуемую амплитуду напряжения на выходе инвертора.

Коэффициенты системы регулирования определены на основании исследований на математической модели [6].

Формирователь трехфазного напряжения производит вычисление требуемых скважностей для каждого плеча инвертора и передает их на выполнение блоку ШИМ, который, в свою очередь, формирует 3 пары комплементарных сигналов, управляющих IGBT транзисторами.

На рис. 5 и 6 приведены осциллограммы тока двигателя при частотах 50 и 5 Гц двигателя захвата ТВС МП 3-го энергоблока Калининской АЭС.

На рис. 7 показана осциллограмма разгона моста.

В заключение приводится (табл. 2) краткий анализ соответствия разработанного комплекса электрооборудования МП требованиям нормативных правил по безопасности [4-6], из которого следует, что новое поколение КЭ соответствует требованиям основных нормативных документов по ядерной безопасности.

Головной образец КЭ успешно прошел автономные и комплексные (в составе модернизированной перегрузочной машины) приемочные испытания, принят приемочной комиссией и в настоящее время внедрен на третьем энергоблоке Калининской АЭС, осуществившей загрузку ядерного топлива в реактор ВВЭР-1000 в штатном режиме.

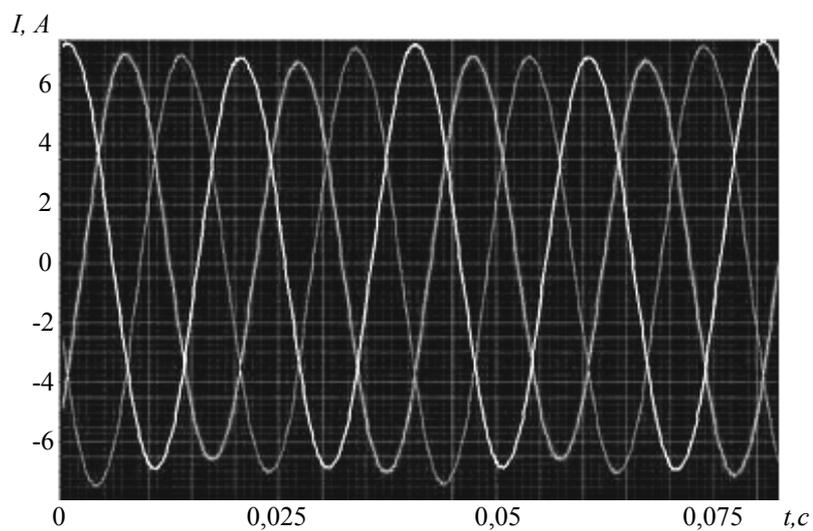


Рис. 5. Формирование тока частотой 50 Гц

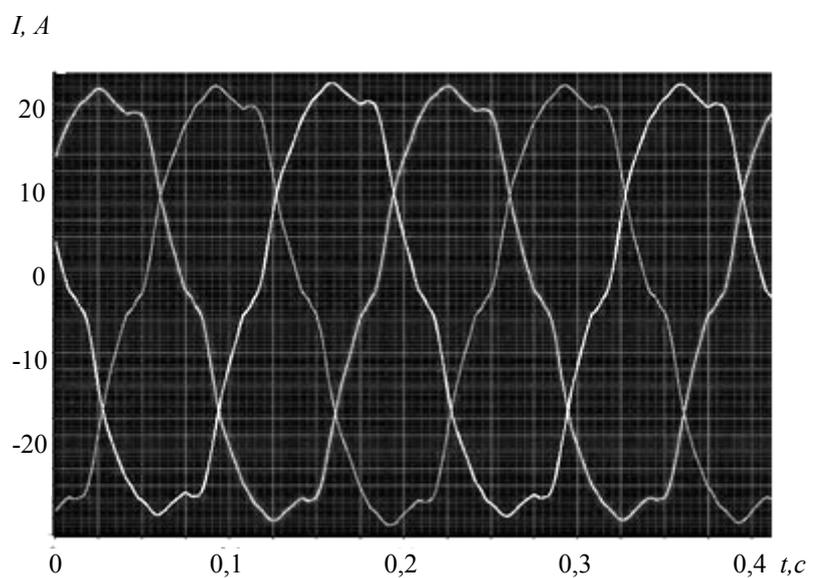


Рис. 6. Формирование тока частотой 5 Гц

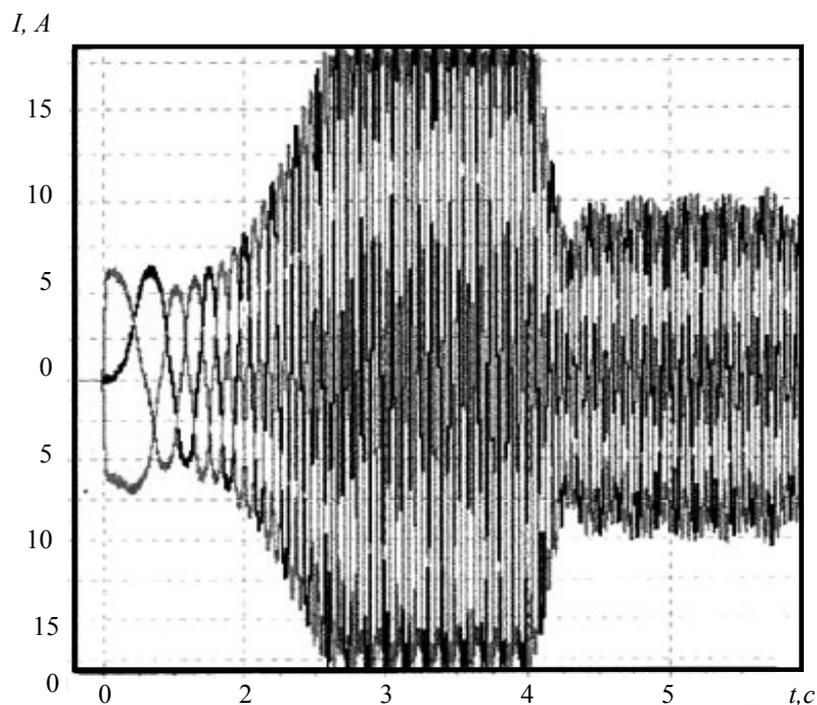


Рис. 7. Разгон моста

Таблица 2

Наименование и пункт правил	Требование правил	Результат анализа
ПБХ и Т ЯТ-91 п.6.5.2.	(...) Должны быть предусмотрены ручные приводы, обеспечивающие возможность приведения системы в безопасное состояние при прекращении подачи электроснабжения	Конструкция двигателей АДА обеспечивает оснащение механизмов МП (мост, тележка, захват ТВС) дублирующими ручными приводами
ПБЯ РУ АС-89 п.2.7.2.7.	При проектировании устройств перегрузки должно быть предусмотрено, чтобы прекращение подачи электроснабжения не	Наличие встроенного в двигатель АДА тормоза (в дополнение к самотормозящемуся редуктору и внешнему тормозу) гарантирует невозможность

Наименование и пункт правил	Требование правил	Результат анализа
	привело к падению ТВС	падения ТВС при прекращении электропитания в результате автоматического наложения при этом внешнего и внутреннего тормозов
ПБЯ РУ АС-89 п.2.7.2.8. ПБХ и Т ЯТ-91 п.6.5.12	В техническом проекте РУ должны быть обоснованы и установлены допустимые скорости перемещения кассет перегрузочными устройствами. Перегрузочная машина должна обеспечивать скорость и ускорение перемещения ядерного топлива, не превышающие установленные в ТУ на ядерное топливо или в другой технической документации.	Частотно-управляемые электроприводы обеспечивают требуемые значения и заданный диапазон скоростей и ускорений механизмов, перемещающих ядерное топливо
ОПБ-88/97 1.2 ПБЯ РУ АС-89 2.4.5 ОПБ-88/97 4.4.4.3	Должны быть диагностированы дефекты и выявлены отклонения от нормальной работы. Должна быть предусмотрена диагностика СКУ РУ УСНЭ...должна обеспечивать автоматическую или автоматизированную диагностику состояния и режимов эксплуатации, в т.ч. и собственно технических и программных средств контроля и управления	В КЭ предусмотрены контроль и диагностика следующих параметров: - температура двигателя; - ток двигателя; - ток электромагнитов внешнего и внутреннего тормозов. Технические и программные средства КЭ имеют развитую систему диагностирования состояния и режимов системы электропитания электроприводов в процессе их эксплуатации
ОПБ-88/97 4.1.5.	Системы (элементы), важные для безопасности, должны быть способны выполнить свои функции в установленном проек-	КЭ соответствует 1 категории сейсмостойкости при сейсмических нагрузках 8 баллов по шкале MSK-64

Наименование и пункт правил	Требование правил	Результат анализа
	том объёме с учётом воздействия природных явлений (землетрясений...)	
ПБЯ РУ АС-89 2.4.2.	СКУ должна обеспечивать контроль и безопасное управление при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях	КЭ обеспечивает контроль и безопасное управление механизмами МП при нормальной эксплуатации (во всех режимах, установленных программой перегрузки топлива), нарушениях нормальной эксплуатации и проектных авариях
ПБЯ РУ АС-89 2.4.19.	СКУ должна быть обеспечена надёжным электропитанием	КЭ обеспечивает надёжное электропитание от двух независимых систем собственных нужд АЭС с АВР
ПБХиТ ЯТ-91 6.5.11	Необходимо предусмотреть остановку перегрузочной машины от сигнала общестанционного сейсмодатчика	КЭ при получении сигнала от системы сейсмозащиты снижает питание с сейсмотормов и приводов всех механизмов МП

Приложение

*Тепловые процессы в двигателе АДА32М4 11кВт n=1500 об/мин **

1. Нагревание при частоте вращения $n=1450$ об/мин

$$1084,7 \frac{d\vartheta_1}{dt} + 33,92\vartheta_1 - 21,9\vartheta_2 - 2,76\vartheta_3 - 9,76\vartheta_4 = P_1;$$

$$1285,4 \frac{d\vartheta_2}{dt} + 27,88\vartheta_2 - 21,9\vartheta_1 - 6,68\vartheta_7 = P_2;$$

$$8345 \frac{d\vartheta_3}{dt} + 178,76\vartheta_3 - 2,76\vartheta_1 - 80,6\vartheta_4 - 95,4\vartheta_6 = P_3;$$

$$2780 \frac{d\vartheta_4}{dt} + 141,16\vartheta_4 - 9,76\vartheta_1 - 80,6\vartheta_3 - 50,8\vartheta_5 = P_4;$$

* - уравнение тепловых процессов представлены С.А. Васюковым

$$11250 \frac{d\vartheta_5}{dt} + 58,06\vartheta_5 - 50,8\vartheta_4 - 7,98\vartheta_7 = P_5;$$

$$23750 \frac{d\vartheta_6}{dt} + 137,3\vartheta_6 - 95,4\vartheta_3 = 0;$$

$$2,5 \frac{d\vartheta_7}{dt} + 30,26\vartheta_7 - 6,68\vartheta_2 - 7,98\vartheta_5 - 15,6\vartheta_8 = P_7;$$

$$9000 \frac{d\vartheta_8}{dt} + 25,52\vartheta_8 - 15,6\vartheta_7 = 0.$$

2. Нагревание при частоте вращения $n \leq 100$ об/мин

$$1084,7 \frac{d\vartheta_1}{dt} + 33,92\vartheta_1 - 21,9\vartheta_2 - 2,76\vartheta_3 - 9,76\vartheta_4 = P_1;$$

$$1285,4 \frac{d\vartheta_2}{dt} + 27,87\vartheta_2 - 21,9\vartheta_1 - 1,67\vartheta_7 = P_2;$$

$$8345 \frac{d\vartheta_3}{dt} + 178,76\vartheta_3 - 2,76\vartheta_1 - 80,6\vartheta_4 - 95,4\vartheta_6 = 0;$$

$$2780 \frac{d\vartheta_4}{dt} + 96,159\vartheta_4 - 9,76\vartheta_1 - 80,6\vartheta_3 - 50,799\vartheta_5 = 0;$$

$$11250 \frac{d\vartheta_5}{dt} + 6,675\vartheta_5 - 5,799\vartheta_4 - 1,596\vartheta_7 = P_5;$$

$$23750 \frac{d\vartheta_6}{dt} + 96,88\vartheta_6 - 95,4\vartheta_3 = 0;$$

$$2,5 \frac{d\vartheta_7}{dt} + 6,386\vartheta_7 - 1,67\vartheta_2 - 1,596\vartheta_5 - 3,12\vartheta_8 = 0;$$

$$9000 \frac{d\vartheta_8}{dt} + 4,13\vartheta_8 - 3,12\vartheta_7 = 0.$$

3. Охлаждение при частоте вращения $n=0$; $I_{дв}=0$; $M_{дв}=0$

$$1084,7 \frac{d\vartheta_1}{dt} + 34,42\vartheta_1 - 21,9\vartheta_2 - 2,76\vartheta_3 - 9,76\vartheta_4 = 0;$$

$$1285,4 \frac{d\vartheta_2}{dt} + 23,57\vartheta_2 - 21,8\vartheta_1 - 1,67\vartheta_7 = 0;$$

$$8345 \frac{d\vartheta_3}{dt} + 178,76\vartheta_3 - 2,76\vartheta_1 - 80,6\vartheta_4 - 95,4\vartheta_6 = 0;$$

$$2780 \frac{d\vartheta_4}{dt} + 91,159\vartheta_4 - 9,76\vartheta_1 - 80,6\vartheta_3 - 50,799\vartheta_5 = 0;$$

$$11250 \frac{d\vartheta_5}{dt} + 7,395\vartheta_5 - 5,799\vartheta_4 - 1,596\vartheta_7 = 0;$$

$$23750 \frac{d\vartheta_6}{dt} + 96,88\vartheta_6 - 95,4\vartheta_3 = 0;$$

$$2,5 \frac{d\vartheta_7}{dt} + 6,386\vartheta_7 - 1,67\vartheta_2 - 1,596\vartheta_5 - 3,12\vartheta_8 = 0;$$

$$9000 \frac{d\vartheta_8}{dt} + 4,13\vartheta_8 - 3,12\vartheta_7 = 0.$$

Обозначения:

ϑ_1 - превышение температуры пазовой части статора;

ϑ_2 - превышение температуры лобовой части обмотки статора;

ϑ_3 - превышение температуры спинки магнитопровода статора;

ϑ_4 - превышение температуры зубцов статора;

ϑ_5 - превышение температуры ротора;

ϑ_6 - превышение температуры воздуха внутри электродвигателя, вокруг лобовых частей обмотки статора;

ϑ_8 - превышение температуры подшипниковых щитов;

P_1 - потери мощности в пазовой части статора;

P_2 - потери мощности лобовой части обмотки статора;

P_3 - потери мощности спинки магнитопровода статора;

P_4 - потери мощности зубцов статора;

P_5 - потери мощности ротора;

P_6 - потери мощности воздуха внутри электродвигателя, вокруг лобовых частей обмотки статора;

P_8 - потери мощности подшипниковых щитов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шиянов А.И. и др. Системы управления перегрузочных машин реакторов АЭС с ВВЭР. М.: Энергоатомиздат. 1987.
2. Жилкин Г.П. и др. Унифицированная система управления перегрузочными машинами атомных станций. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 76. 1984.
3. Гизатуллин Ш.К. и др. Система управления перегрузкой топлива реактора ВВЭР-1000. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 94. 1990.

4. Портной Ю.Т. Системы управления перегрузочными машинами АЭС с реакторами ВВЭР-1000. М.: Труды НПП ВНИИЭМ. Т. 100. 2001.
5. Жемчугов Г.А. и др. Серия асинхронных двигателей АДА для приводов механизмов атомных электростанций. М.: Электротехника. №7. 2001.
6. Мищенко В.А. и др. Математическое моделирование, оптимизация структуры и параметров для повышения качества регулирования скорости асинхронного электропривода перегрузочной машины. Отчет НИР ЗАО «ОПТИМУМ-ЭЛЕКТРО». 2002.