

Глава 11

Расчеты переходных процессов в узлах нагрузки

§ 11.1. Самозапуск асинхронных электродвигателей

Переходные процессы, протекающие в узлах нагрузки при перерывах питания, рассмотрим на примере системы собственных нужд (с.н.) электростанций. Расход электроэнергии на собственные нужды тепловых (ТЭС) и атомных (АЭС) электростанций в зависимости от особенностей технологической схемы, сжигаемого топлива и других факторов может составлять 4÷15%, поэтому системы электроснабжения с.н. электростанций являются крупными узлами нагрузки. Механизмы с.н. электростанций с асинхронным электроприводом, обеспечивающие работу турбогенераторов, паротурбинных установок, парогенераторов, ядерных реакторов, по надежности электроснабжения относятся к первой категории и требуют двух независимых источников питания. Основным требованием, предъявляемым к схемам электроснабжения с.н. электростанций, является обеспечение самозапуска электродвигателей ответственных механизмов с.н. при автоматических переключениях с рабочего источника питания на резервный источник для сохранения устойчивости технологического процесса. Обоснование технических решений, удовлетворяющих требованиям нормативных документов, можно сделать на основе методов математического моделирования многомашинных электрических схем с.н. электростанций [58, 59].

На рис. 11.1 приведена схема электрических соединений Балаковской атомной электростанции с четырьмя энергоблоками мощностью 1000 МВт каждый с водо-водяными энергетическими ядерными реакторами типа ВВЭР-1000. Рабочим источником питания потребителей с.н. блока при работе на мощности является генератор блока, резервным источником является энергосистема. Рабочие трансформаторы с.н. (ТСН) с расщепленной обмоткой низшего напряжения блоков (ВТ01 и ВТ02) мощностью 63 МВ·А подключаются отпайкой к генераторному токопроводу, потребители с.н. подключаются к четырем секциям ВА, ВВ, ВС и ВD распределительного устройства с.н. 6,3 кВ.

Резервное питание потребителей с.н. от энергосистемы осуществляется через понижающие трансформаторы по магистралям резервного питания. На четыре комплекта рабочих ТСН установлено два комплекта из двух резервных трансформаторов (РТСН) мощностью 63 МВ·А каждый.

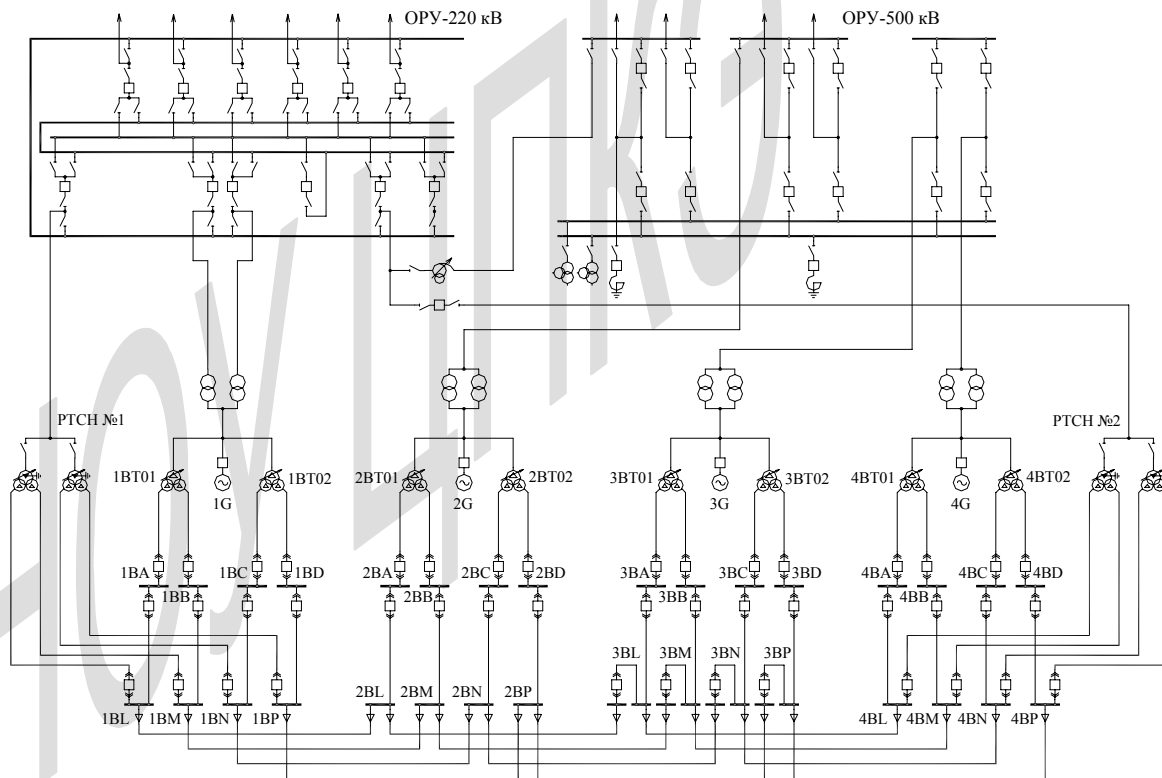


Рис. 11.1. Схема электрических соединений АЭС с реакторами ВВЭР-1000 мощностью 4000 МВт

Первый комплект подключен к распределительному устройству 220 кВ стандартно, а второй комплект через собственный выключатель подключен к автотрансформатору связи со стороны 220 кВ. Это позволяет подать напряжение на секции с.н. из сети 500 кВ через автотрансформатор связи даже при погашении распределительного устройства 220 кВ.

Рабочие вводы питания от ТСН на секции ВА, ВВ, ВС, ВD распределительного устройства с.н., вводы от резервных трансформаторов к сборкам ВL, ВМ, ВN, ВР четырех магистралей резервного питания и резервные вводы питания от сборок ВL, ВМ, ВN, ВР на секции с.н. выполнены комплектным экранированным токопроводом. Сами магистрали резервного питания между блоками (длина примерно 250 м) выполнены кабелем для уменьшения индуктивного сопротивления и падения напряжения на магистралях, чтобы обеспечить успешный самозапуск.

Состав потребителей с.н. на напряжении 6 кВ и их распределение по секциям представлены в табл. 11.1. Кроме указанных в этой таблице потребителей к секциям 6,3 кВ распределительного устройства с.н. подключены рабочие и резервные трансформаторы 6,3/0,4 кВ (номинальная мощность трансформаторов 1000 и 400 кВ·А) машинного зала, аппаратного отделения, компенсатора объема, агрегатов бесперебойного питания, системы управления и защиты и др.

В колонке «Мощность» табл. 11.1 в первой строке приведена номинальная мощность асинхронного двигателя, а во второй – мощность механизма с.н. при номинальной частоте вращения. Отношение мощности механизма к номинальной мощности двигателя дает коэффициент загрузки ($K_{згр}$) двигателя.

Для ограничения уровня токов короткого замыкания в сети с.н. 6 кВ запрещена параллельная работа резервных трансформаторов на магистралях резервного питания. Поэтому магистрали секционированы через два блока выключателями на сборках 3ВL, 3ВМ, 3ВN, 3ВР. Секционирующие выключатели нормально отключены и включаются только при выводе одного из комплектов РТСН в ремонт. Также запрещена параллельная работа рабочих и резервных ТСН на секциях распределительного устройства собственных нужд.

Перевод питания с рабочего источника на резервный осуществляется автоматически. Выключатели вводов резервного питания включаются по факту отключения выключателей вводов рабочего питания при наличии напряжения на сборках магистралей резервного питания.

Таблица 11.1.

Потребители собственных нужд энергоблока с реактором ВВЭР-1000

Наименование механизма	Имя	Мощность кВт	T_j с	Число на секциях			
				BA	BB	BC	BD
Главный циркуляционный насос	ГЦН	8000 5300	11,0	1	1	1	1
Циркуляционный насос	ЦН	4000 4000	3,1	1	–	1	1
Конденсатный насос второй ступени	КН2	1600 1190	1,9	1	–	1	1
Конденсатный насос первой ступени	КН1	1000 620	2,4	1	–	1	1
Насос технической воды неотвественных потребителей	ННП	1000 675	1,7	1	–	1	–
Подпиточный насос	ПН	800 690	1,7	1	1	1	–
Вспомогательный питательный насос	ВПН	800 700	1,7	–	1	–	1
Сетевой насос	СН	630 628	1,0	1	–	–	1
Насос замкнутого контура ОГЦ	НОГЦ	630 445	1,5	1	–	1	–
Насос слива сепарата турбоустановки	НСС	500 460	1,5	–	1	–	1
Сливной насос ПНД3	СН3	500 287	1,5	–	1	1	1
Насос подъемный маслоохладителей	НПМО	400 400	1,4	1	–	1	–
Сливной насос ПНД1	СН1	320 210	1,2	1	1	1	–
Конденсатный насос ПСВ	НПСВ	250 225	1,1	–	1	–	1

Сеть электроснабжения с.н. станции связана с сетью энергосистемы, поэтому на режим работы с.н. влияют возмущения в сети 220 и 500 кВ. При возмущениях в сети высшего напряжения и в цепи генератора в сети с.н. возможно значительное снижение напряжения.

При отключении энергоблока перевод потребителей с.н. с рабочего источника питания на резервный происходит с перерывом питания. Длительность перерыва питания зависит от вида возмущения, параметров выключателей вводов питания, типов, уставок, способа резервирования технологических и релейных защит энергоблока и элемен-

тов схемы с.н. При действии резервных защит продолжительность нарушения электроснабжения потребителей с.н. может достигать $1,5 \div 1,8$ с. Поэтому главные циркуляционные насосы, обеспечивающие необходимый расход теплоносителя через активную зону ядерного реактора, имеют маховик (инерционная постоянная $T_J = 11$ с), что повышает устойчивость технологического режима ядерной энергетической установки при близких коротких замыканиях в сети 220 и 500 кВ.

Рассмотрим поведение асинхронных электродвигателей механизмов с.н. при одновременном автоматическом переключении секций ВА, ВВ, ВС и ВD распределительного устройства с.н. энергоблока с рабочего на резервный источник с перерывом питания 1,8 с. В расчетах переходных процессов электродвигатели 6 кВ моделируются индивидуально, а асинхронная нагрузка 0,38 кВ, подключенная к трансформаторам 6/0,4 кВ, замещается эквивалентными двигателями со средними значениями каталожных параметров. Параметры электродвигателей 6 кВ приведены в табл.11.2.

Таблица 11.2.

Параметры электродвигателей механизмов собственных нужд

Имя	P_n кВт	$\cos \varphi_n$	η_n	s_n %	M_{\max} н.о.е.	M_n н.о.е.	I_n н.о.е.	$K_{згр}$
ГЦН	8000	0,96	96,0	0,5	3,4	1,64	8,1	0,663
ЦН	4000	0,7	95,0	1,0	2,08	0,63	3,8	1,0
КН2	1600	0,905	96,5	0,83	2,2	0,85	5,5	0,744
КН1	1000	0,88	94	1,3	2,1	0,8	5,5	0,62
ННП	1000	0,84	94,2	1,4	1,9	0,6	4,5	0,675
ПН	800	0,9	95,7	1,0	1,9	1,1	5,2	0,863
ВПН	800	0,9	95,7	1,0	1,9	1,1	5,2	0,875
СН	630	0,89	94,5	1,3	2,2	1,1	5,7	0,997
НОГЦ	630	0,87	94,0	1,5	2,0	1,0	4,6	0,706
НСС	500	0,9	93,6	1,0	2,3	1,0	6,5	0,92
СНЗ	500	0,9	93,6	1,0	2,3	1,0	6,5	0,574
НПМО	400	0,83	93,5	2,0	2,1	1,2	5,1	1,0
СН1	320	0,9	93,0	1,5	2,4	1,5	6,5	0,656
НПСВ	250	0,91	93,4	1,0	2,9	1,0	7,0	0,9

На рис. 11.2 представлены осциллограммы выбега и самозапуска электродвигателей 6 кВ на секции ВА второго энергоблока (для секций ВВ, ВС и ВD осциллограммы имеют такой же характер). Напряжение на секциях отнесено к номинальному напряжению сети с.н. 6,3 кВ, частота вращения отнесена к номинальной синхронной частоте вращения, а электромагнитный момент и ток каждого из двигателей выражены в относительных единицах при номинальных условиях.

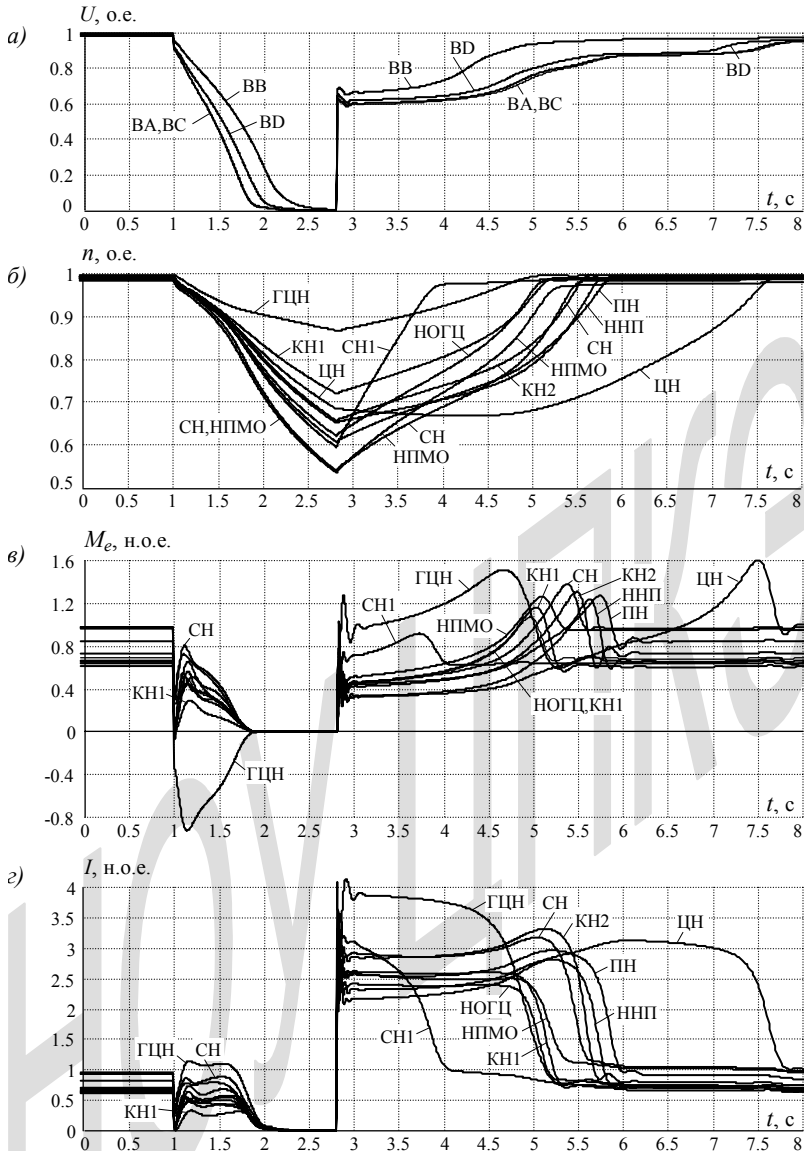


Рис. 11.2. Изменение напряжений на секциях с.н. (а), частоты вращения (б), электромагнитного момента (в) и тока (г) двигателей секции ВА при переключении на резервный источник с перерывом питания 1,8 с

Отключение выключателей рабочих вводов питания происходит через 1 с, время отсчитывается от начала расчета переходного процесса. После отключения ввода рабочего питания напряжение на секции скачком снижается до 0,92 о.е., рис. 11.2, *а*. Источником напряжения являются подключенные к секции электродвигатели, в обмотках вращающихся роторов которых протекает переменный ток.

Скорость затухания токов в обмотках ротора и напряжения на секциях зависит от параметров самого двигателя, а также коэффициента загрузки двигателей, параметров кабельных линий питания и других факторов. Кинетическая энергия, запасенная во вращающихся массах агрегатов двигатель-механизм, расходуется в механизмах с.н., поэтому частота вращения агрегатов и соответственно частота напряжения на секции уменьшаются. По мере уменьшения частоты вращения и затухания токов в обмотке ротора выбегающих двигателей происходит плавное снижение модуля напряжения, к концу выбега напряжение на секциях с.н. снижается до нуля, рис. 11.2, *а*.

В начале перерыва питания в течение примерно 0,7 с происходит групповой выбег электродвигателей, рис. 11.2, *б*, их частота вращения уменьшается практически одинаково. Высокоинерционные агрегаты двигатель-механизм переходят в режим асинхронных генераторов и расходуют свою кинетическую энергию на поддержание частоты вращения агрегатов, имеющих сравнительно небольшое значение инерционной постоянной, поэтому тормозятся сильнее, чем при индивидуальном выбеге. В рассматриваемой схеме асинхронным генератором становится двигатель ГЦН (его электромагнитный момент изменяет знак), рис. 11.2, *в*. В схемах с.н. обычных ТЭС в генераторный режим одновременно или попеременно могут переходить двигатели дымососов, вентиляторов, питательных насосов.

По мере затухания токов в обмотках ротора двигателей их взаимосвязь постепенно ослабевает, групповой выбег плавно переходит в индивидуальный. Можно считать, что при уровне напряжения на секции примерно 0,3 о.е. групповой выбег практически заканчивается, рис. 11.1, *а* и *б*. При индивидуальном выбеге скорость снижения частоты вращения агрегатов двигатель-механизм определяется собственной кинетической энергией вращающихся масс (инерционной постоянной агрегата), коэффициентом загрузки двигателя и зависимостью момента сопротивления механизма с.н. от частоты вращения, рис. 11.2, *б*.

После включения ввода резервного питания начинается самозапуск электродвигателей, который по сути является одновременным пуском двигателей с достигнутых ими промежуточных частот вращения. Начальное напряжение на секции ВА после включения ввода ре-

зервного питания получается весьма низким (0,6 о.е.) вследствие падения напряжения от пусковых токов двигателей секций ВА, ВВ, ВС и ВД на сопротивлениях элементов схемы резервного питания с.н. («система», РТСН, токопроводы и кабели магистралей резервного питания). Момент асинхронных двигателей пропорционален квадрату напряжения, следовательно, при таком уровне напряжений момент двигателей составляет примерно 36 % от значения момента при номинальном напряжении. Тем не менее, самозапуск протекает уверенно и заканчивается через 5 с, считая от момента включения ввода резервного питания.

Быстрее всех при самозапуске от промежуточной частоты вращения 0,6 о.е., достигнутой при выбеге, разгоняется малоинерционный агрегат СН1. Это объясняется тем, что его двигатель имеет хорошие пусковые характеристики и небольшой коэффициент загрузки, табл. 11.2. Быстрый самозапуск СН1 практически не повлиял на уровень напряжения на секции с.н., т.к. мощность двигателя сравнительно небольшая.

Мощный электродвигатель ГЦН имеет хорошие пусковые характеристики, небольшой коэффициент загрузки, табл. 11.2, и тормозится до частоты вращения всего 0,867 о.е. в конце выбега. Поэтому даже при низком уровне начального напряжения и большой инерционной постоянной происходит быстрый разгон ГЦН. При прохождении двигателем ГЦН критического скольжения и быстром спаде его тока, рис. 11.1, з, суммарный ток секции ВА заметно уменьшается (кратность пускового тока ГЦН высокая, табл. 11.2), падение напряжения в сети также уменьшается, а напряжение на секции ВА возрастает до 0,74 о.е. После этого скорость разгона остальных двигателей увеличивается и их самозапуск быстро завершается.

Электродвигатель ЦН с точки зрения самозапуска подобран неудачно. Он имеет неудовлетворительные пусковые характеристики при высоком коэффициенте загрузки, табл. 11.2. Поэтому после восстановления питания агрегат ЦН продолжает тормозиться, затем зависает на промежуточной частоте вращения и начинает разгоняться лишь после того, как завершается самозапуск большинства агрегатов с.н., фактически при номинальном напряжении на секции.

Следует заметить, что кратность максимального момента двигателей при прохождении критического скольжения, рис. 11.2, в, оказывается меньше, чем каталожная кратность максимального момента, приведенная в табл. 11.2. Это объясняется тем, что модель двигателя на основе уравнений Парка-Горева, § 7.3, воспроизводит реальные динамические, а не статические пусковые характеристики (снятые для

серии установившихся асинхронных режимов с различными скольжениями при постоянстве скольжения и напряжения статора). Чем больше угловое ускорение ротора, тем сильнее различаются динамические и статические характеристики при прочих равных условиях. Кроме того, значение электромагнитного момента двигателя уменьшается пропорционально квадрату текущего значения напряжения статора. Поэтому при самозапуске кратность максимального момента ГЦН оказывается даже меньше кратности максимального момента ЦН вследствие того, что при прохождении критического скольжения ГЦН напряжение на секции равно примерно 0,74 о.е., а ЦН завершает самозапуск уже при напряжении, близком к номинальному.

Скорость роста напряжения на секциях с.н. в начале самозапуска заметно меньше, чем в конце, рис. 11.1, а. Изменение напряжения на секции и токов двигателей взаимосвязаны. При разгоне токи двигателей уменьшаются, следовательно, уменьшается падение напряжения на элементах сети, а напряжение на секциях возрастает. Но рост напряжения вызывает увеличение тока двигателей и падение напряжения. Увеличение напряжения на секциях с.н. происходит за счет спада пускового тока мощных ГЦН, у остальных двигателей ток при разгоне, наоборот, начинает увеличиваться за счет роста напряжения, рис. 11.2, г, вплоть до прохождения критического скольжения.

При коротком замыкании в сети с.н. поведение асинхронной нагрузки отличается от ее поведения при перерывах питания. На рис. 11.3 приведены осциллограммы переходного процесса при возникновении трехфазного к.з. в начале кабельной линии одного из присоединений к секции ВА, отключении к.з. основной релейной защитой присоединения и последующем самозапуске асинхронных двигателей от рабочего ТСН. Короткое замыкание возникает через 0,5 с от начала расчета переходного процесса и длится 0,17 с.

При трехфазном к.з. напряжение на секции ВА снижается практически до нуля, но на смежной секции ВВ снижается только до 0,9 о.е., рис. 11.3, а, благодаря большому поперечному сопротивлению ТСН с расщепленной обмоткой НН.

Точка трехфазного к.з. разделяет асинхронные двигатели секции ВА, двигатели на этой секции при к.з. выбегают индивидуально, рис. 11.3, б, стадия группового выбега отсутствует. Двигатель ГЦН сохраняет устойчивость, скольжение остальных двигателей к концу к.з. превышает критическое.

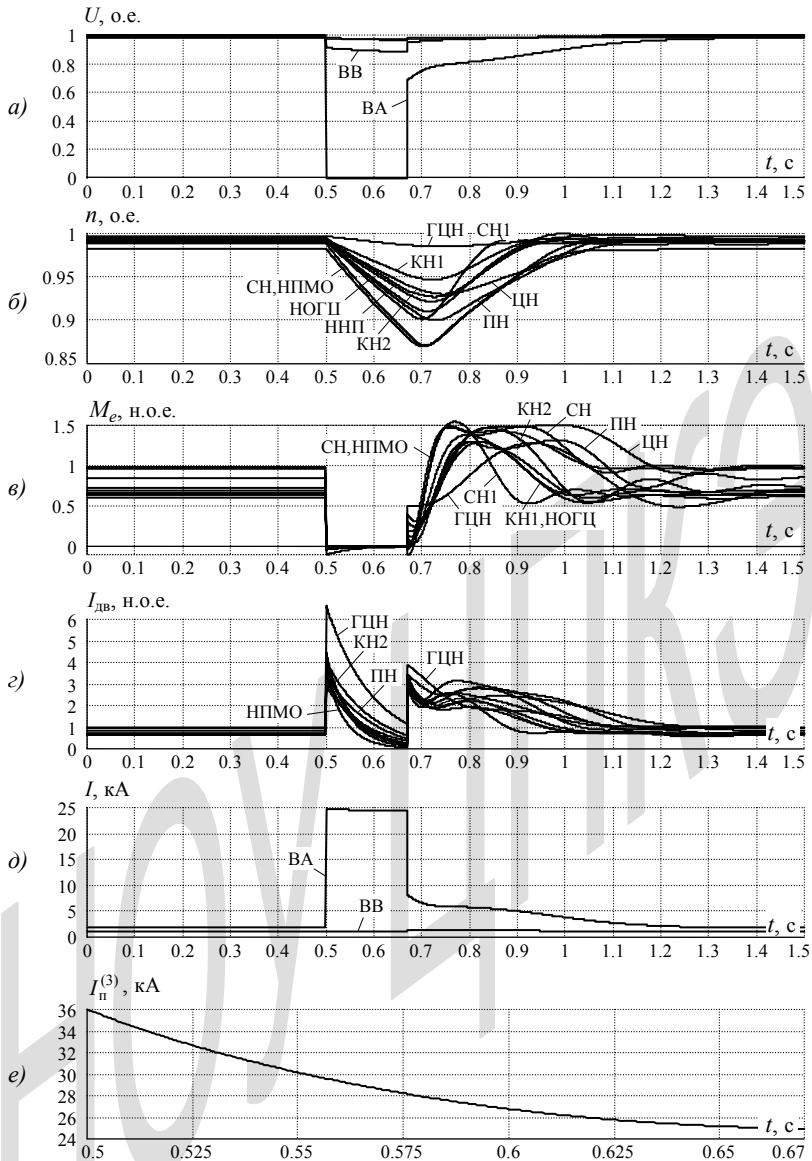


Рис. 11.3. Изменение напряжения на секциях с.н. (а), частоты вращения (б), электромагнитного момента (в) и тока двигателя секции ВА, тока ввода рабочего питания от рабочего ТСН (д) и суммарного тока в точке трехфазного к.з. в начале присоединения к секции ВА (е)

Все двигатели на секции ВА при возникновении короткого замыкания переходят в генераторный режим, рис. 11.3, в, и подпитывают точку к.з., рис. 11.3, г, причем в начальный момент действующее значение периодической составляющей токов двигателей в 3÷6,5 раз превышает их номинальный ток. Чем выше кратность пускового тока двигателя, тем больше его ток подпитки точки короткого замыкания.

Периодическая составляющая тока трехфазного к.з. через ввод рабочего питания равна 25 кА, рис. 11.3, д. Периодическая составляющая суммарного тока в точке к.з. уменьшается от 36 кА в начальный момент до 24,9 кА к моменту отключения к.з., рис. 11.3, е, вследствие затухания токов к.з. от асинхронных двигателей, рис. 11.3, г. Периодическая составляющая тока подпитки точки к.з. от двигателей в начальный момент равна 11 кА и составляет 46% тока к.з. через ввод рабочего питания. Такая большая составляющая тока к.з. от двигателей объясняется наличием в схеме уникального асинхронного электродвигателя ГЦН мощностью 8 МВт, табл. 11.2.

Рис. 11.3 иллюстрирует также токоограничивающие свойства трансформаторов с расщепленной обмоткой НН. Уменьшение тока к.з. происходит, прежде всего, за счет того, что при расщеплении обмотки НН мощность каждой из обмоток равна половине номинальной мощности трансформатора. При к.з. на секции ВА напряжение на секции ВВ при к.з. снижается до 0,9÷0,88 о.е., рис. 11.3, а, поэтому двигатели на секции ВВ не участвуют в подпитке точки к.з. на смежной секции. Они тормозятся, но сохраняют устойчивость и продолжают работать в двигательном режиме. Это способствует сохранению устойчивости технологического режима энергоблока при возникновении возмущений в схеме электроснабжения потребителей с.н.

§ 11.2. Пуск асинхронных двигателей от автономных источников

На атомных электростанциях имеются особо ответственные потребители, обеспечивающие безопасность АЭС [60, 61]. Часть этих потребителей работает и в нормальных режимах, остальные включаются при авариях в ядерной энергетической установке. Для электроснабжения особо ответственных потребителей предусматривают автономные источники (дизель-генераторы, газотурбинные установки), которые должны обеспечить пуск и питание этих потребителей при совпадении максимальной проектной аварии в ядерной энергетической установке и аварии в энергосистеме с потерей и рабочего, и резервного источников питания собственных нужд.

Если в энергосистеме имеются ГЭС, то для повышения надежности электроснабжения потребителей систем безопасности в случае отказа автономных источников целесообразно предусмотреть специальную системную автоматику, которая выделяет ГЭС на питание системы собственных нужд АЭС, после чего возможен автоматический пуск особо ответственных потребителей от выделенных агрегатов ГЭС. Мощность генераторов ГЭС больше мощности автономных источников, но расстояние между ГЭС и АЭС может быть значительным, поэтому необходима проверка возможности приема нагрузки систем безопасности выделенными агрегатами ГЭС. Натурные испытания таких процессов в полном объеме провести практически невозможно, поэтому для проверки технических решений необходимо использовать методы математического моделирования. При этом для настройки математической модели целесообразно провести упрощенный эксперимент, например, осуществить пуск от гидрогенератора крупного электродвигателя. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными позволяет уточнить параметры модели.

На рис. 11.4 показан один из вариантов схемы резервного электроснабжения механизмов аварийного расхолаживания ядерных реакторов ВВЭР-440 первого (секции 1РБ-2 и 2РБ-2) и второго (секции 3РБ-2 и 4РБ-2) энергоблоков Кольской АЭС от выделенных агрегатов ГЭС Нива-1.

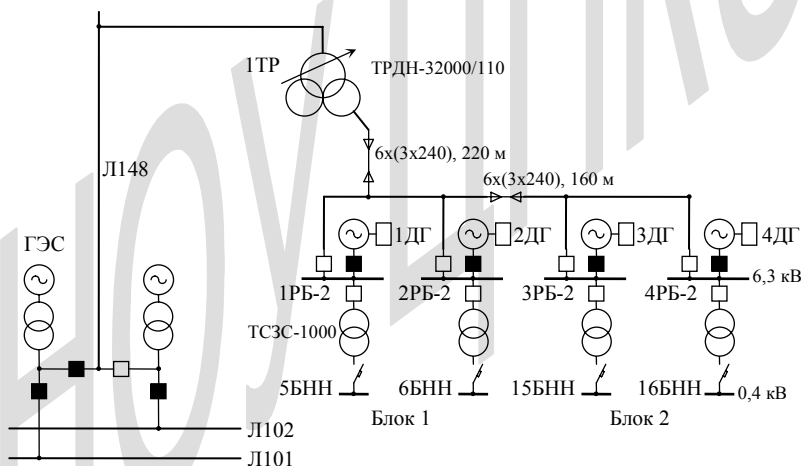


Рис. 11.4. Схема электроснабжения с.н. АЭС от выделенного агрегата ГЭС

При аварийном обесточивании системы собственных нужд для питания механизмов аварийного расхолаживания запускаются авто-

номные дизель-генераторы. Их номинальная мощность 1600 кВт соизмерима с мощностью асинхронной нагрузки, поэтому ее включение выполняется поочередно при помощи автоматики ступенчатого пуска (АСП). В штатном режиме каждый дизель-генератор подключается к своей секции надежного питания РБ-2 и принимает свою нагрузку 6 и 0,4 кВ по графику АСП, которая включает двигатели на секциях 6 кВ и 0,4 кВ в очередности, определяемой технологией расхолаживания ядерного реактора. Настройка АСП для всех секций РБ-2 и БНН одинакова.

При системной аварии для питания с.н. АЭС выделяется ГЭС. В случае неуспешного запуска дизель-генераторов возможен пуск и питание всей нагрузки систем аварийного расхолаживания первого и второго блоков от ГЭС через повышающие трансформаторы, линию 110 кВ Л148, резервный трансформатор с.н. 1ТР и сеть 6 кВ собственных нужд станции. Подключение нагрузки к выделенному гидрогенератору также осуществляется по графику АСП. Время включения очередей АСП на всех секциях надежного питания одинаково, поэтому необходимо проверить, что от одного выделенного гидрогенератора ГЭС можно произвести одновременный автоматический запуск двигателей систем аварийного расхолаживания обоих блоков.

Состав потребителей систем аварийного электроснабжения первого и второго блоков, их сокращенные имена, последовательность и время включения АСП представлены в табл. 11.3, а параметры электродвигателей – в табл. 11.4.

На ГЭС Нива-1 установлены поворотно-лопастные гидравлические турбины, номинальный напор $H_n = 11,55$ м, номинальный расход $Q_n = 138$ м³/с, длина подводящего канала $L = 1150$ м. Время сервомотора направляющего аппарата на закрытие $T_z = 5$ с, на открытие $T_o = 6$ с, время сервомотора лопастей рабочего колеса на сворачивание лопастей $T_{св} = 22$ с, на разворот лопастей $T_{рв} = 74$ с. Статизм регулирования $\sigma = 5$ %, время двигателя МИЧО (от 0 до 5%) равно 10 с.

Параметры гидрогенераторов ГЭС: $P_n = 13$ МВт, $\cos \varphi_n = 0,8$, $\eta_n = 97\%$, $n_n = 107$ об/мин, $x_d = 0,81$, $x_q = 0,62$, $x'_d = 0,28$, $x'_q = 0,2$, $x_s = 0,15$, $T_J = 6,65$ с, $T_{d0} = 3,5$ с. Генераторы имеют тиристорную систему самовозбуждения с АРВ сильного действия.

Параметры повышающих трансформаторов ГЭС: $S_n = 15$ МВ·А, $U_{вн} / U_{нн} = 121/10,5$ кВ, напряжение короткого замыкания 11,22 %.

Таблица 11.3
Состав механизмов системы аварийного расхолаживания

Наименование механизма	Секции 6 кВ				Время вкл. ступени, с
	1РБ-2	2РБ-2	3РБ-2	4РБ-2	
Аварийный насос технической воды	1АНТВ-1	1АНТВ-2	2АНТВ-1	2АНТВ-2	0
Аварийный подпиточный насос ввода бора	1АПН-1	1АПН-3	2АПН-1	2АПН-3	10
Аварийный подпиточный насос ввода бора	1АПН-2	1АПН-4	2АПН-2	2АПН-4	17
Секции 0,4 кВ					
	5БНН	6БНН	15БНН	16БНН	
Аварийный питательный электронасос	1АПЭН-1	1АПЭН-2	2АПЭН-1	2АПЭН-2	5
Насос масляный основной турбогенератора	1МН-1	1МН-2	2МН-1	2МН-2	30
Насос промконтура ГЦН	1НПК-1	1НПК-2	2НПК-1	2НПК-2	40
Насос промконтура СУЗ	1НПКС-1	1НПКС-2	2НПКС-1	2НПКС-2	
Вентилятор системы Р1	1Р1-1	1Р1-2	2Р1-1	2Р1-2	50
Вентилятор системы В2	1В2-1	–	2В2-1	–	
Насос организованных протечек	1НОП-1	–	2НОП-1	–	
Насос обессоленной воды баков запаса	1НОВ-1	–	2НОВ-1	–	
Насос подпиточный	1ПН-1	1ПН-2	2ПН-1	2ПН-2	75
Насос борный спринклерной установки	1НБС-1	1НБС-2	2НБС-1	2НБС-2	90

Таблица 11.4

Параметры электродвигателей механизмов системы аварийного расхолаживания

Имя	P_n кВт	$\cos \varphi_n$	η_n	s_n %	M_{max} н.о.е.	M_n н.о.е.	I_n н.о.е.	$K_{згр}$	T_J с
АПН	400	0,92	93,0	1,0	2,6	1,4	7,3	0,8	2,14
АНТВ	320	0,9	93,0	1,33	2,3	1,7	6,0	0,906	1,45
АПЭН	200	0,9	94,0	1,17	2,0	0,9	6,5	0,78	0,74
Р1	110	0,86	92,5	2,0	2,0	1,0	5,0	0,945	2,93
НБС	75	0,92	92,5	1,33	2,0	1,1	7,0	0,6	0,5
НПК	75	0,89	93,0	1,33	2,0	1,1	7,0	0,613	0,5
МН	55	0,92	92,5	1,33	2,0	1,1	7,0	0,782	0,78
ПН	40	0,91	89,0	0,67	2,2	1,1	7,0	0,75	0,73
В2	35	0,83	89,0	0,83	2,0	1,2	5,0	0,846	2,73
НПКС	30	0,92	90,2	2,5	2,0	1,0	7,1	0,8	0,7
НВО	30	0,92	90,2	2,33	2,0	1,0	7,3	0,8	0,84
НОП	30	0,9	89,0	2,33	2,0	1,1	7,8	0,8	0,73

Длина линии 110 кВ от ГЭС до резервного трансформатора 1ТР 11 км, $\dot{z}_0 = 0,249 + j0,42$ Ом/км. Сеть с.н. 6 кВ выполнена экранированным токопроводом, протяженные участки от резервного ТСН до секций РБ-2 и между блоками выполнены кабельными вставками из шести параллельно включенных кабелей с сечением жилы 240 мм².

Процесс ступенчатого приема нагрузки гидрогенератором показан на рис. 11.5. На рис. 11.6 показан процесс пуска двигателей, включаемых первыми четырьмя очередями АСП на секциях 1РБ-2 и 5БНН. На расчетных осциллограммах режимные параметры генератора и двигателей выражены в относительных единицах при номинальных условиях. Частота вращения гидроагрегата отнесена к номинальной частоте вращения, активная и реактивная мощности генератора отнесены к номинальной полной мощности, напряжения на секциях РБ-2 отнесены к номинальному напряжению 6,3 кВ, на секциях БНН – к 0,4 кВ.

Комбинированная отрицательная обратная связь АРС гидротурбины, § 6.5, и большая постоянная времени сервомотора предопределяют невысокую скорость реакции турбины на изменение нагрузки. Это приводит к значительным понижениям частоты до 0,94 о.е. (47 Гц) при включении наиболее мощных третьей и четвертой ступеней пуска. Снижение частоты облегчает пуск двигателей. По окончании пуска устанавливается частота 48,8 Гц.

В пусковом токе двигателей, рис. 11.6, в, индуктивная составляющая преобладает над активной, поэтому при включении и пуске ступени реактивная мощность генератора резко возрастает, рис. 11.5, а. Пусковой ток двигателей размагничивает генератор, поэтому при включении наиболее мощных третьей и четвертой ступеней нагрузки напряжение на выводах генератора снижается до $(0,835 \div 0,85) U_n$, рис. 11.5, б, происходит кратковременная форсировка возбуждения.

Большой пусковой ток двигателей, рис. 11.6, в, создает значительное падение напряжения на трансформаторах и линии 110 кВ, поэтому напряжение на секциях с.н. при включении наиболее мощных ступеней нагрузки понижается до 0,7 о.е., рис. 11.5, б. При таком уровне начального напряжения и хороших пусковых характеристиках двигателей, табл.11.4, происходит уверенный запуск двигателей, максимальное время пуска ступени не превышает 2 с, рис. 11.6, а. При включении следующих ступеней устойчивость двигателей, запущенных в предыдущих ступенях, сохраняется, изменение их частоты вращения следует за изменениями частоты вращения гидрогенератора.

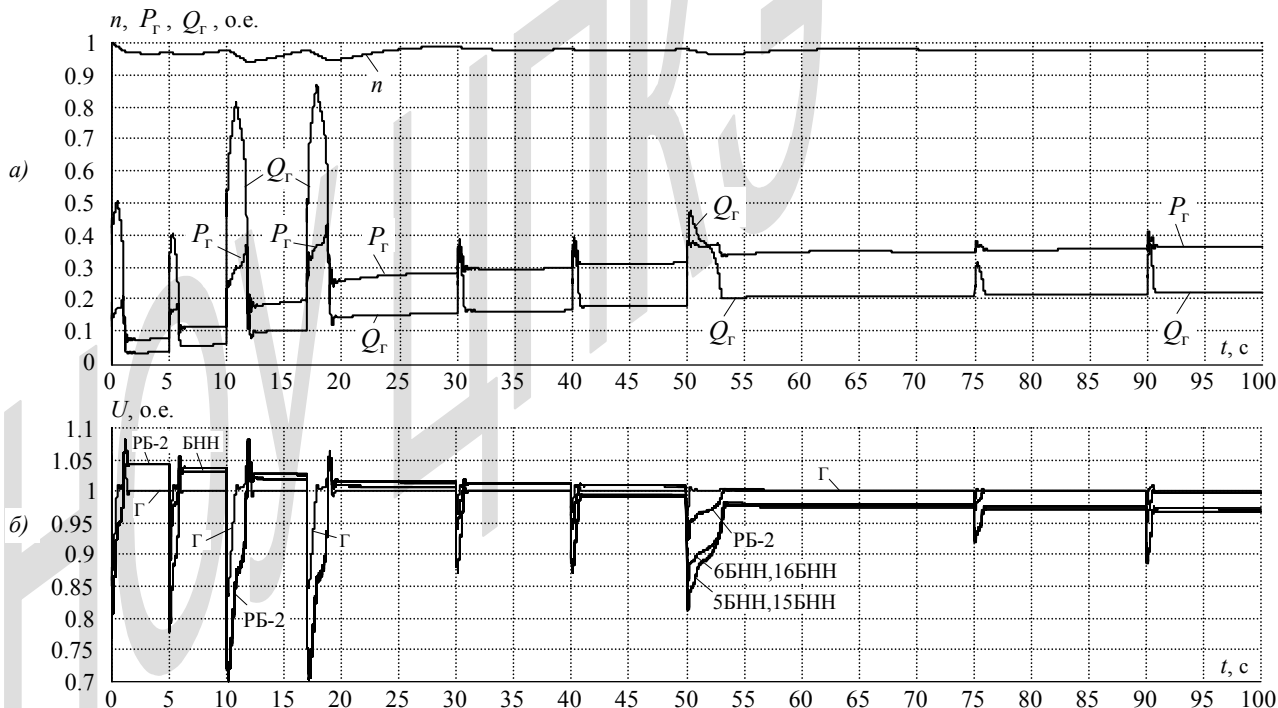


Рис. 11.5. Изменение частоты вращения, активной и реактивной мощности гидрогенератора (а), напряжения на выводах генератора (Γ) и на секциях РБ-2, БНН (б) при ступенчатом пуске нагрузки системы аварийного расхолаживания

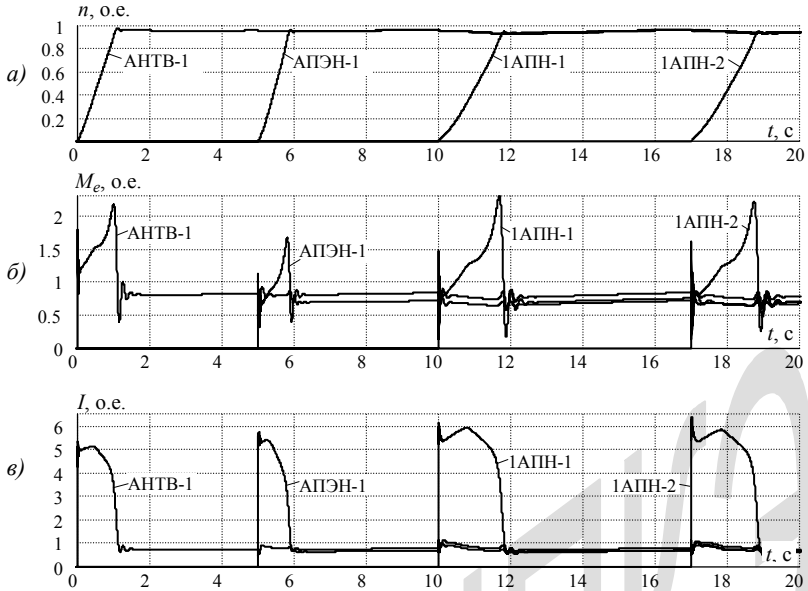


Рис. 11.6. Изменение частоты вращения (а), электромагнитного момента (б) и тока (в) при пуске первых четырех ступеней на секциях РБ-2, БНН

Таким образом, гидрогенератор ГЭС Нива-1, расположенной вблизи Кольской АЭС, обеспечивает одновременный уверенный прием и питание нагрузки систем безопасности первого и второго блоков.

§ 11.3. Влияние конденсаторных батарей на переходные процессы в узле нагрузки

Рассмотрим поведение двигателей в узле нагрузки, показанном на рис. 11.7.

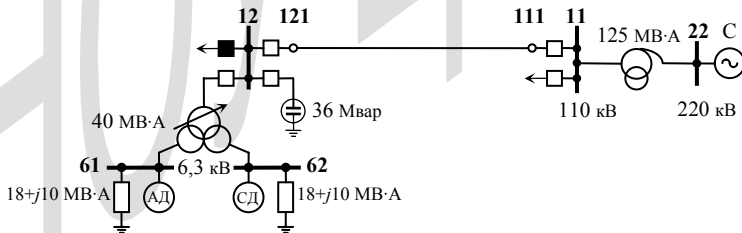


Рис. 11.7. Расчетная схема

В ремонтной схеме питание нагрузки осуществляется по одной линии 110 кВ длиной 40 км от шин подстанции 11, другая линия отключена. Необходимый уровень напряжения в узлах 61 и 62, близкий к 6,3 кВ, в ремонтной схеме при максимальной нагрузке $36 + j20$ МВ·А можно обеспечить, установив при помощи РПН минимальный коэффициент трансформации понижающего трансформатора, либо включив полностью конденсаторную батарею мощностью 36 Мвар (при напряжении 110 кВ), не изменяя коэффициент трансформации. Напряжение в узле 22 при изменении режима узла 11 можно считать постоянным, равным 230 кВ.

При использовании РПН понижающего трансформатора напряжение в узле 12 равно 108 кВ, потери активной мощности в линии 11-12 составляют 1,91 МВт. При полном включении конденсаторной батареи напряжение в узле 12 равно 120 кВ, потери в линии снижаются до 1,42 МВт.

Мощность нагрузки в максимальном режиме в узлах 61 и 62 примерно одинакова. В узле 61 на долю асинхронной составляющей нагрузки приходится 50%, на долю статической составляющей нагрузки тоже 50%, синхронной нагрузки нет. В узле 62 на долю синхронной нагрузки приходится 40%, на долю статической нагрузки – 60%, асинхронной нагрузки нет. Такое разделение асинхронной и синхронной нагрузки по узлам сделано специально, чтобы уменьшить их взаимосвязь и упростить анализ переходного процесса. Поперечное сопротивление трансформатора с расщепленной обмоткой НН велико, поэтому связь между двигательной нагрузкой, включенной в узлах 61 и 62, слабая (см. § 11.1).

Двигательная нагрузка представлена эквивалентными двигателями со средними значениями параметров. Средневзвешенное значение инерционной постоянной агрегата асинхронный двигатель-механизм равно $T_J = 1,4$ с, коэффициента загрузки двигателя $K_{згр} = 0,82$. Для агрегата синхронный двигатель-механизм средневзвешенные значения $T_J = 2,5$ с, $K_{згр} = 0,85$. Момент сопротивления эквивалентных механизмов, § 7.13, пропорционален квадрату частоты вращения.

Синхронный двигатель имеет статическое возбудительное устройство (СВУ), § 7.12, выход которого пропорционален напряжению в узле. Подача возбуждения при асинхронном пуске двигателя осуществляется автоматически по достижении входного скольжения 0,05. Имеется автоматика ресинхронизации, которая при увеличении скольжения ротора более 0,05 гасит поле возбуждения переводом СВУ в инверторный режим, отключает обмотку возбуждения от СВУ и замыкает ее на активное сопротивление. При разгоне двигателя после вос-

становления питания возбуждение подается при достижении входного скольжения 0,05.

Рассмотрим поведение двигателей при возникновении трехфазного к.з. длительность 0,18 с в конце линии 11-12 (вблизи узла 12) с отключением линии и последующим автоматическим повторным включением через 0,82 с. Суммарная длительность к.з. и перерыва питания составляет 1,0 с.

На рис. 11.8 показаны расчетные осциллограммы переходного процесса при отключенной конденсаторной батарее, а на рис. 11.9 – при включенной батарее. Режимные параметры двигателей на осциллограммах выражены в относительных единицах при номинальных условиях, напряжение отнесено к номинальному напряжению 6,3 кВ.

Короткое замыкание на линии 11-12 возникает через 1 с от начала расчета переходного процесса. При возникновении к.з. эквивалентные двигатели в узлах 61 и 62 переходят в генераторный режим, подпитывая точку к.з., и тормозятся. Напряжение в узлах 61 и 62 при к.з. определяется падением напряжения на трансформаторе от токов подпитки двигателей. Ток подпитки точки к.з. от асинхронного двигателя за 0,18 с затухает до 0,1 о.е., у синхронного двигателя ток снижается до 2,3 о.е. К моменту окончания к.з. скольжение синхронного двигателя превышает 0,05, автоматика ресинхронизации переводит СВУ в инверторный режим, к обмотке возбуждения двигателя прикладывается напряжение развозбуждения E_r обратной полярности, рис. 11.8, б.

После отключения линии 11-12 возникает перерыв питания, двигатели продолжают тормозиться. Напряжение в узле 62 после отключения к.з. определяется возбуждением синхронного двигателя и частотой вращения его ротора и возрастает до 0,35 о.е. Двигатель продолжает работать в генераторном режиме (его электромагнитный момент остается отрицательным), отдавая мощность в основном статической нагрузке в своем узле. Связь с узлом 61 слабая, в нагрузку соседнего узла передается небольшая мощность. При этом напряжение в узле 61 составляет 0,29 о.е., асинхронный двигатель из генераторного режима возвращается в двигательный режим, что замедляет его торможение. К концу перерыва питания частота вращения асинхронного двигателя снижается до 0,67 о.е., синхронного – до 0,69 о.е.

При перерыве питания СВУ синхронного двигателя получает питание от него самого, поэтому значение напряжения E_r обратной полярности в инверторном режиме не превышает 1,13 о.е. Гашение поля возбуждения двигателя приводит к снижению напряжения в узле и, соответственно, уменьшению напряжения развозбуждения двигателя.

Поэтому гашение поля происходит медленно, к моменту включения линии 11-12 поле возбуждения двигателя еще не погашено.

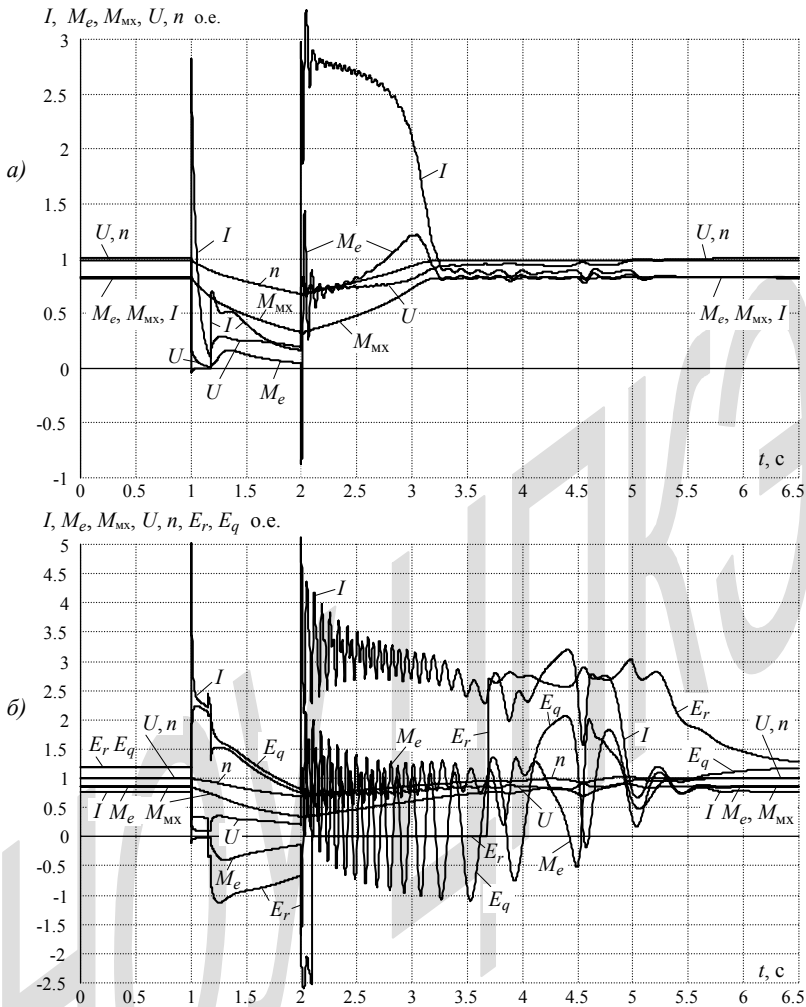


Рис. 11.8. Изменение тока (I), электромагнитного момента (M_e), момента механизма (M_{MX}), напряжения (U), частоты вращения (n), напряжения возбуждения (E_r) и ЭДС (E_q) асинхронного (а) и синхронного (б) электродвигателей при трехфазном к.з. длительностью 0,18 с в конце линии 11-12, отключении линии и ее повторном включении через 0,82 с (конденсаторная батарея отключена)

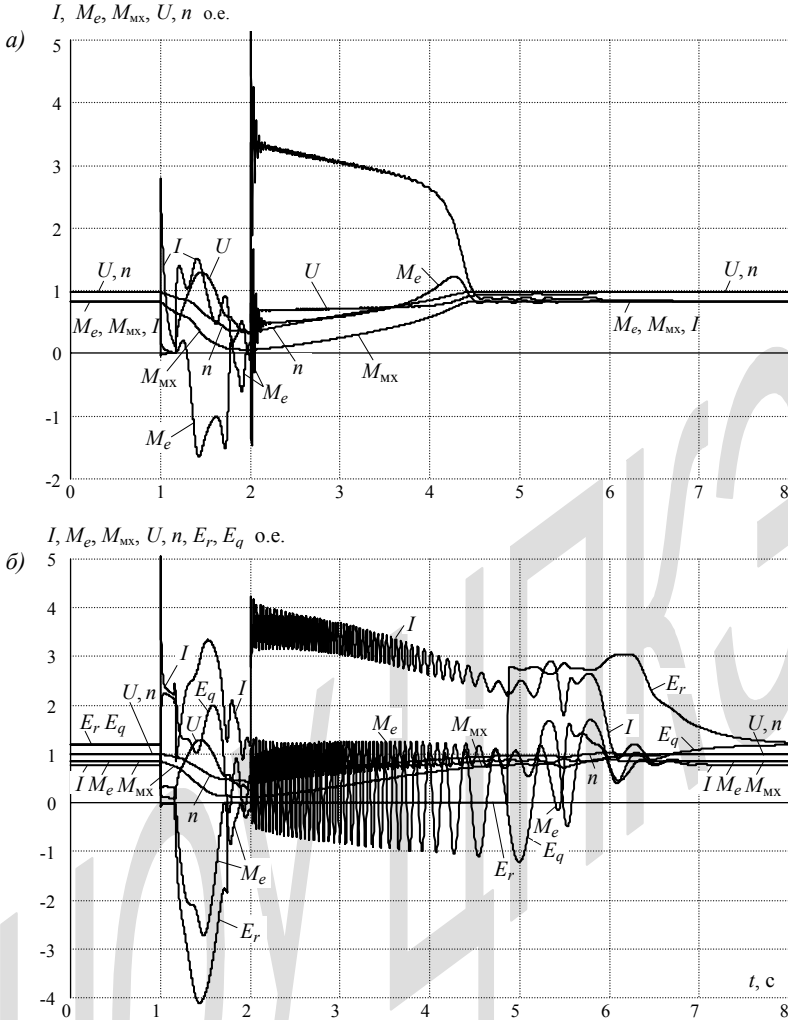


Рис. 11.9. Изменение тока (I), электромагнитного момента (M_e), момента механизма (M_{MX}), напряжения (U), частоты вращения (n), напряжения возбуждения (E_r) и ЭДС (E_q) асинхронного (а) и синхронного (б) электродвигателей при трехфазном к.з. длительностью 0,18 с в конце линии 11-12, отключении линии и ее повторном включении через 0,82 с (конденсаторная батарея включена)

После восстановления питания напряжение в узлах 61 и 62 скачком возрастает до 0,72 о.е. Напряжение развозбуждения обратной по-

лярности, приложенное к обмотке возбуждения от СВУ, резко возрастает до 2,5 о.е., скорость гашения поля увеличивается. Двигатель переходит в асинхронный режим и в токе обмотки возбуждения, замкнутой на СВУ, появляется переменная составляющая. При первом прохождении тока возбуждения (ЭДС E_q , см. § 5.1) через ноль обмотка возбуждения отключается от возбудителя и замыкается на активное сопротивление, рис. 11.8, б, в момент времени $t = 2,09$ с от начала расчета. Напряжение, приложенное к обмотке возбуждения двигателя, становится равным нулю, само СВУ и его АРВ продолжают работать.

После восстановления питания избыточный момент на валу агрегата асинхронный двигатель-механизм, равный разности моментов двигателя и механизма, возрастает от 0,34 о.е. в начале самозапуска до 0,472 о.е. в конце. При значении инерционной постоянной $T_J = 1,4$ с такой избыточный момент обеспечивает большое угловое ускорение ротора агрегата, самозапуск завершается за 1,2 с и режимные параметры двигателя возвращаются к исходным значениям до возмущения режима.

В отличие от асинхронного двигателя электромагнитный момент и ток синхронного двигателя при самозапуске имеют переменную составляющую, обусловленную несимметрией машины по осям d и q . При достижении входного скольжения СВУ подключается к обмотке возбуждения ($t = 3,68$ с), значение напряжения на обмотке возбуждения скачком изменяется от нуля до 2,65 о.е. После двух асинхронных «проворотов» (значение E_q после подачи возбуждения дважды изменило знак) двигатель в течение примерно 3 с втягивается в синхронизм. Режимные параметры возвращаются к исходным значениям.

При включенной конденсаторной батарее характер переходного процесса на стадии перерыва питания существенно изменяется, рис. 11.9. После отключения линии 11-12 нагрузка в узлах 61 и 62 остается соединенной с конденсаторной батареей большой емкости. Это приводит к асинхронному самовозбуждению выбегающей асинхронной и синхронной нагрузки [1]. Напряжение в узле 61 кратковременно возрастает до 1,29 о.е., асинхронный двигатель переходит в генераторный режим, отдавая мощность статической нагрузке своего узла. Напряжение в узле 62 кратковременно возрастает до 1,24 о.е., синхронный двигатель продолжает работать в генераторном режиме, отдавая мощность статической нагрузке своего узла. При максимальном уровне напряжений в узлах нагрузки в узле 12 на конденсаторной батарее напряжение возрастает до 160 кВ, что превышает максимально допус-

тимое рабочее напряжение, поэтому для защиты от перенапряжений целесообразно предусмотреть ОПН.

Следует заметить, что напряжения в узлах 61, 62 и 12 при асинхронном самовозбуждении двигателей получились несколько повышенными вследствие того, что не учтены активные и индуктивные сопротивления элементов схемы электроснабжения на напряжении 6 кВ (для упрощения анализа в примере взята предельно простая схема с двумя двигателями). В практических расчетах самовозбуждения необходимо двигательную нагрузку разбить на несколько групп по удаленности от понижающего трансформатора и учесть сопротивление элементов питающей сети.

Мощность статической составляющей нагрузки пропорциональна квадрату напряжения, ее потребление при самовозбуждении возрастает. На питание нагрузки расходуется кинетическая энергия вращающихся машин. Это вызывает ускоренное торможение двигателей и к концу перерыва питания частота вращения асинхронного двигателя снижается до 0,33 о.е., а синхронного – до 0,45 о.е. Вследствие снижения частоты вращения двигателей самовозбуждение двигателей уменьшается, напряжение в узлах 61 и 62 после достижения максимального значения начинает снижаться.

При перерыве питания в узле 62 одновременно протекают два процесса: растет напряжение за счет асинхронного самовозбуждения синхронного двигателя при наличии в схеме конденсаторной батареи большой мощности и происходит гашение основного поля возбуждения, причем питание СВУ обеспечивает сам двигатель. За счет роста напряжения в узле 62 значение напряжения E_r обратной полярности при переводе СВУ в инверторный режим возрастает до 4 о.е., что обеспечивает быстрое гашение поля.

В момент времени $t = 1,75$ с от начала расчета переходного процесса, рис. 11.9, б, ЭДС E_q проходит через ноль, обмотка возбуждения отключается от возбудителя и замыкается на активное сопротивление. С этого момента обмотка возбуждения также начинает участвовать в асинхронном самовозбуждении двигателя, вызывая колебания тока и напряжения двигателя вследствие увеличения несимметрии машины по осям d и q .

После включения линии 11-12 двигатели переходят из генераторного в двигательный режим. Начальное напряжение при самозапуске в узле 61 равно 0,68 о.е., а в узле 62 – 0,7 о.е. Самозапуск асинхронного двигателя завершается за 2,5 с. Синхронный двигатель достигает входного скольжения за 2,8 с, при этом подается возбуждение и после одного асинхронного «проворота» двигатель втягивается в синхро-

низм. По завершении переходного процесса режимные параметры двигателей возвращаются к исходным значениям.

Длительность перерыва питания может быть различной. При увеличении перерыва питания до 2 с эффект асинхронного самовозбуждения полностью исчезает вследствие торможения двигателей и затухания токов в обмотках двигателей. При уменьшении перерыва питания и включении линии в неблагоприятный момент противофазы ЭДС генератора (в узле 22) и двигателей возникают значительные всплески тока и момента двигателей, которые могут привести к повреждению двигателей.

Анализ переходных процессов в узлах нагрузки показывает, что математические модели асинхронного и синхронного двигателей на основе модифицированных уравнений Парка-Горева (глава 7) обеспечивает адекватное воспроизведение поведения двигателей при различных возмущениях и в различных схемах.

Следует подчеркнуть, что модель двигателей, не учитывающая переходные процессы в обмотках ротора, совершенно не пригодна для расчета переходных процессов в узлах нагрузки. Она не воспроизводит динамические пусковые характеристики двигателей, переход двигателей в генераторный режим, подпитку точки к.з. от двигателей, перераспределение кинетической энергии вращающихся масс агрегатов двигатель-механизм, групповой выбег двигателей и затухание напряжения при перерывах питания, самовозбуждение двигателей при наличии больших емкостей в схеме, а также разрывает взаимосвязь роторов двигателей и генераторов.

Указанные дефекты статической модели двигателей не позволяют применять эту модель в расчетах переходных процессов не только в узлах нагрузки, но и в энергосистемах, так как некорректная модель двигательной составляющей комплексной нагрузки узлов неизбежно вызовет искажение движения энергосистемы.