

УДК 621.311.182

Переходные процессы в системах аварийного электроснабжения электростанций и подстанций

О. Ю. Гусев, Ю. П. Гусев*, Е. П. Окнин, Г. Ч. Чо

Представлены результаты расчетно-теоретического исследования переходных процессов, вызванных пусками асинхронных двигателей, в системе аварийного электроснабжения, состоящей из дизель-генератора, тиристорного шестипульсного выпрямителя, аккумуляторной батареи, трехфазного инвертора с регулятором на широтно-импульсном модуляторе, с использованием математической модели, разработанной на основе программного комплекса EMTP-RV (POWERSYS Corporate headquarters). Рассмотрены вопросы обеспечения требований современных международных и национальных стандартов по электромагнитной совместимости и совместимости динамических характеристик оборудования систем аварийного электроснабжения для собственных нужд электростанций и подстанций.

Ключевые слова: аварийное электроснабжение, переходные процессы, математическая модель, электромагнитная совместимость, провалы и отклонения напряжения, инвертор, асинхронный двигатель, пуски электродвигателей.

Системы аварийного электроснабжения (САЭ), использующие в качестве резервных источников дизель-генераторы и аккумуляторные батареи, давно задействованы на атомных электростанциях (рис. 1). В последние годы их стали применять в составе собственных нужд и на электростанциях других типов. Также рассматривается целесообразность эксплуатации САЭ в электрических сетях на подстанциях напряжением 330 кВ и выше для обеспечения работы систем пожаротушения, аварийной вентиляции закрытых элегазовых распределительных устройств и других ответственных электроприемников.

Объем научных исследований режимов работы САЭ, количество и качество нормативных документов, необходимых для их проектирования и эксплуатации, не соответствуют важности вопроса и масштабам возможных последствий их отказов. Косвенно это подтверждается инцидентами на атомных электростанциях, в частности, отказом САЭ на атомной

электростанции Forsmark-1 (Швеция), и статистикой, приведенной в [1]. Известные международные, национальные и отраслевые стандарты [2 — 5] содержат не-

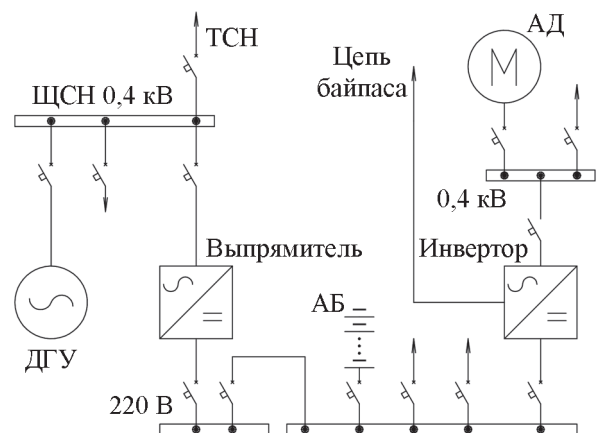


Рис. 1. Принципиальная схема САЭ собственных нужд атомной электростанции:

ЩСН — шит собственных нужд; ТСН — трансформатор собственных нужд; АД — асинхронный двигатель; АКБ — аккумуляторная батарея; ДГУ — дизель-генераторная установка

* gusevyp@mail.ru

однозначные, а иногда и противоречивые требования к оборудованию систем. Особенно это относится к параметрам, регламентирующим электромагнитную совместимость и условия срабатывания защит при возникновении переходных процессов в полупроводниковых преобразовательных устройствах, вызываемых резкими изменениями нагрузки и короткими замыканиями на электростанциях и в примыкающих к ним участках электрической сети.

В последние годы в выпрямителях и инверторах САЭ вместо тиристоров устанавливают новые полупроводниковые элементы — MOSFET- и IGBT-модули, а вместо аналоговых — цифровые регуляторы. Новая элементная база существенно меняет динамические характеристики САЭ: повышается трудоемкость расчета режимов и анализа переходных процессов. Для полноценного исследования современных САЭ, использующих классические вращающиеся электрические машины в сочетании с современными устройствами преобразовательной техники, необходимы новые математические модели. Приведем результаты исследований, выполненных на кафедре «Электрические станции» Московского энергетического института

(МЭИ), в ходе которых была разработана математическая модель современной САЭ, рис. 2, и с ее помощью проанализирована электромагнитная совместимость оборудования системы, соответствие его требованиям действующих международных, национальных и отраслевых стандартов.

Разработанная модель верифицирована путем сопоставления результатов компьютерных расчетов и натурных экспериментов, проведенных в учебно-исследовательском центре кафедры «Электрические станции», который был создан на кафедре в рамках программы развития МЭИ. В частности, были закуплены комплексы инновационного оборудования, произведенного фирмой GUTOR Electronic LLC (Швейцария), входящие в состав систем оперативного постоянного тока и собственных нужд переменного тока.

Расчетно-теоретическое исследование выполнено применительно к САЭ атомной электростанции, питающей электроприемники систем безопасности: электроприводов насосов, клапанов и задвижек трубопроводов, аварийного освещения, системы контроля и управления ядерным реактором. Были проанализированы переходные процессы, вызванные пуском асин-

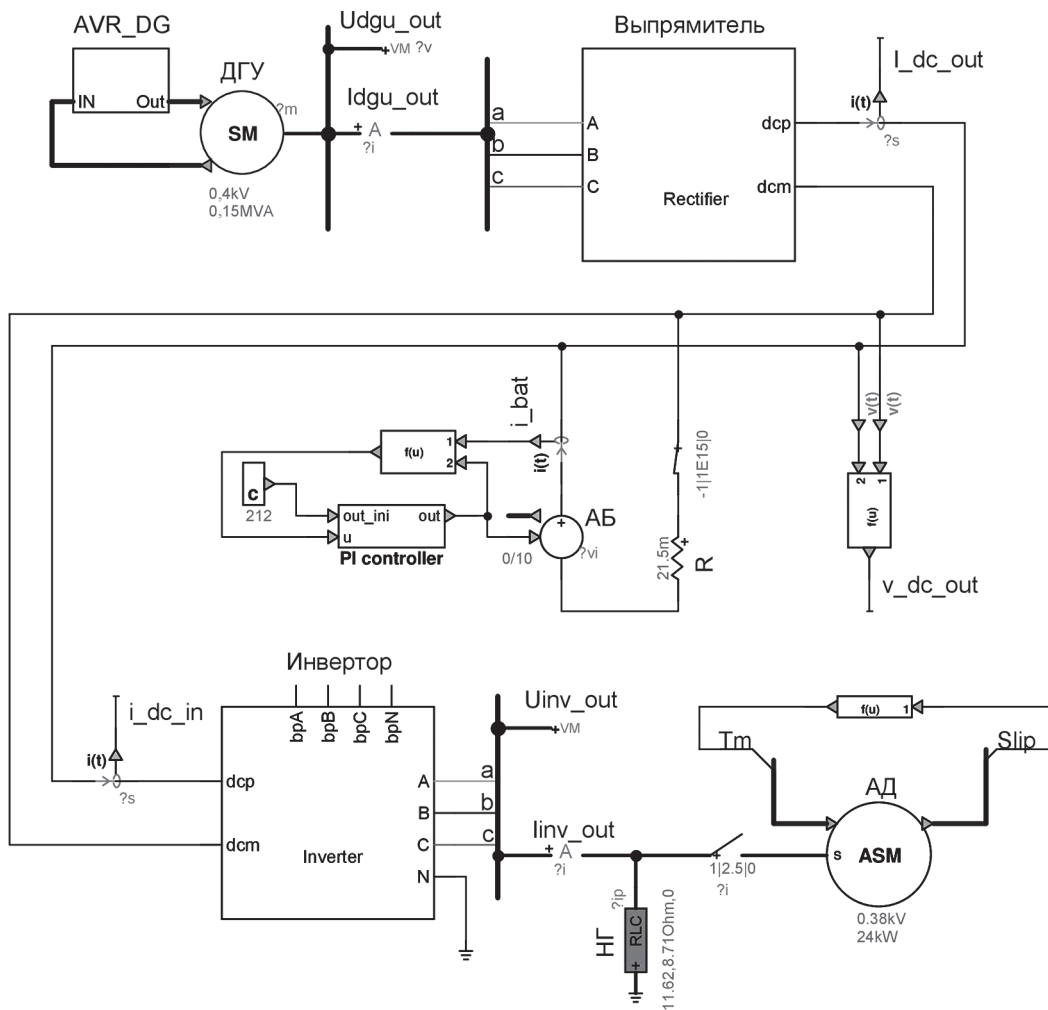


Рис. 2. Структурная схема модели САЭ в программном комплексе EMTP-RV

хронных двигателей (АД), при отключении рабочего трансформатора собственных нужд (ТСН) и переводе питания щита собственных нужд (ЩСН) на дизель-генераторную установку (ДГУ). Номинальные параметры ДГУ, выпрямителя, аккумуляторной батареи (АБ), инвертора и нагрузки, подключенной к инвертору, соответствуют проектным данным одной из атомных станций. Емкость аккумуляторной батареи рассчитана на поддержку автономной работы САЭ в течение 24 ч.

Модели выпрямителя и инвертора состоят из двух частей: силовой и блоков управления. Силовая часть содержит преобразовательный трансформатор со схемой соединений обмоток «Y/Δ», тиристорный мост и фильтр сглаживания пульсаций выходного напряжения, включающий дроссель и конденсатор.

Выпрямитель работает по шестипульсовой схеме. При переходных процессах основное влияние на его работу оказывают регуляторы, включенные в модель блоков управления. Напряжение на выходе корректируется пропорционально-интегральным регулятором, ограничивающим выходной ток выпрямителя в соответствии с заданными пределами его изменения. При отклонении напряжения на входе за пределы допустимых значений предусмотрено снятие импульсов управления тиристорами и отключение выпрямителя.

В совокупности регулятор по напряжению, ограничитель выходного тока и логика отключения определяют поведение выпрямителя при возмущениях как со стороны источника переменного, так и со стороны нагрузки постоянного токов.

К силовой части инвертора относятся сглаживающий конденсатор на его входе, IGBT-мост, дроссель, трансформатор, конденсаторы на выходе и тиристорный статический ключ, переключающий на резервный источник — «байпас».

Принцип действия инвертора базируется на широтно-импульсной модуляции (ШИМ) коммутаций биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT). Работой IGBT-моста управляет модуль с базовой частотой модуляции 2,1 кГц. Задающий сигнал формируется системой ограничения мгновенных значений тока и пропорционально-интегральным регулятором, контролирующим напряжение на выходе инвертора. При отклонении параметров входного напряжения за допустимые пределы, а также при отказе силовой части инвертора нагрузка на резервный источник без перерыва питания переключается с помощью тиристорного статического переключателя.

Модель ДГУ включает в себя, кроме уравнений синхронного генератора, уравнения дизеля с регулятором топливоподачи, системы и регулятора возбуждения. Модель аккумуляторной батареи учитывает электродвижущую силу (ЭДС) поляризации и позволяет задавать степень заряженности аккумуляторов и учитывать степень их износа.

На модели были проведены расчеты переходного процесса в САЭ при пуске асинхронного двигателя электропривода задвижек технологического трубопровода. Двигатель подключался к выходной сборке 0,4 кВ инвертора. В расчете были приняты следующие параметры компонентов системы:

Генератор: $P_{\text{НОМ}} = 0,12 \text{ МВт}$; $U_{\text{НОМ}} = 0,4 \text{ кВ}$; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$;
 $I_{\text{фх}} = 27 \text{ А}$; $X_{d''} = 0,16 \text{ о.е.}$; $X_{d'} = 0,17 \text{ о.е.}$; $X_d = 2,02 \text{ о.е.}$;
 $X_0 = 0,08 \text{ о.е.}$; $T_{d''}^{(3)} = 0,011 \text{ с}$; $T_{d'}^{(3)} = 0,035 \text{ с}$.

Зарядное устройство: $U_{\text{вх.НОМ}} = 400 \text{ В}$; $U_{\text{вых}} = 236,4 \text{ В}$;
 $I_{\text{НОМ}} = 630 \text{ А}$.

Аккумуляторная батарея: $C_{10} = 1000 \text{ А}\cdot\text{ч}$; $R_{\text{АБ}} = 21,5 \text{ мОм}$; количество аккумуляторов — 106 шт.

Инвертор: $U_{\text{вых.НОМ}} = 400 \text{ В}$; $U_{\text{вх.НОМ}} = 220 \text{ В}$; $S_{\text{НОМ}} = 100 \text{ кВА}$; $I_{\text{лим}} = 4I_{\text{НОМ}}$ (уставка токоограничения).

Асинхронный двигатель: $P_{\text{НОМ}} = 24 \text{ кВт}$; $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$; $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,91$; $\cos\varphi_{\text{п}} = 0,3$; $I_{\text{п}}/I_{\text{НОМ}} = 7,0$;
 $M_{\text{п}}/M_{\text{НОМ}} = 1,4$; $M_{\text{max}}/M_{\text{НОМ}} = 2,5$; $\eta_{\text{НОМ}} = 89\%$; $s_{\text{НОМ}} = 1,9\%$;
 $J = 0,255 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{рад}$; момент сопротивления механизма — постоянный; коэффициент загрузки — 0,8.

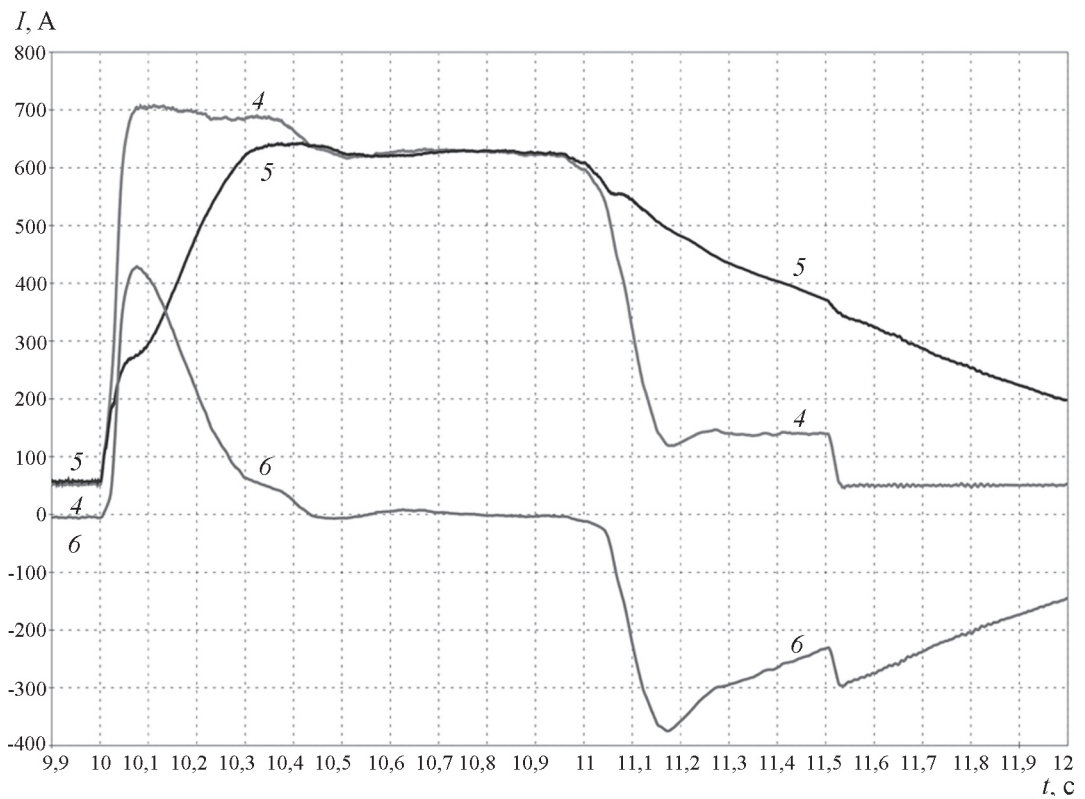
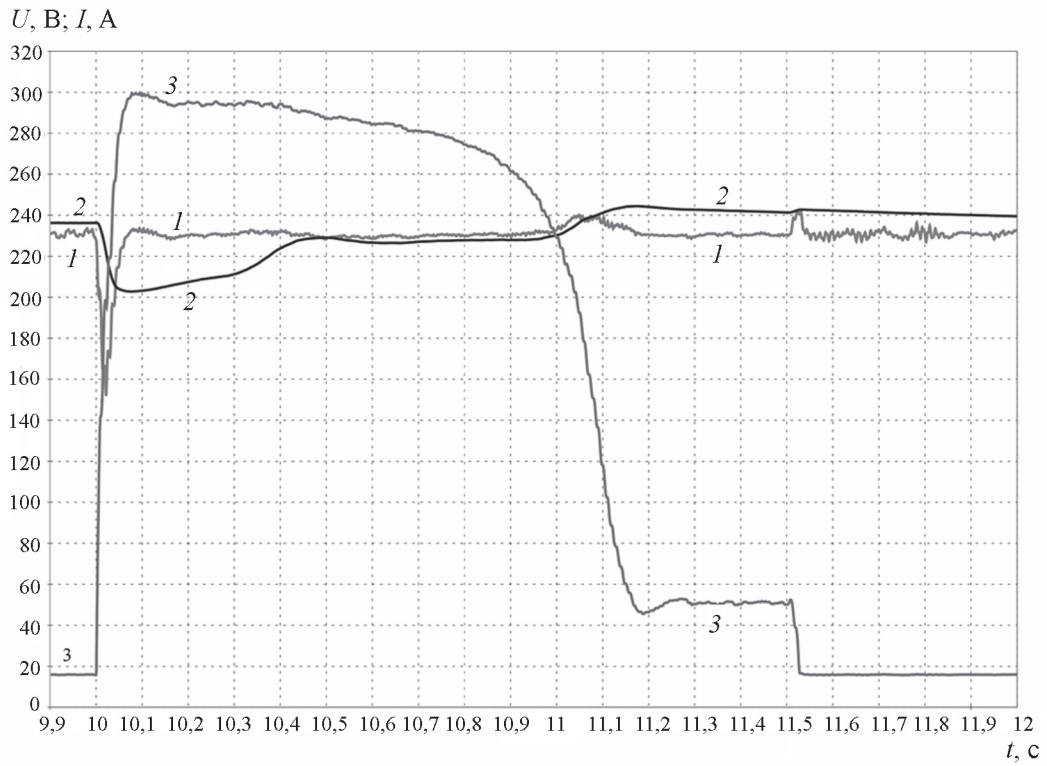
Статическая нагрузка: $S_{\text{НОМ}} = 10 \text{ кВА}$; $U_{\text{НОМ}} = 380 \text{ В}$;
 $\cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$.

Результаты расчета переходных процессов представлены на рис. 3 в виде приведенных к 20 мс среднеквадратичных (для переменных) и средних (для постоянных) значений напряжений и токов. Пульсации токов и напряжений не отображены, но в первичных результатах расчета они имеются.

В предшествующем пуску двигателя режиме работы фазное напряжение на шинах ДГУ составляло 233 В, ток на входе выпрямителя — 84,2 А. Выпрямитель обеспечивал поддерживающий заряд аккумуляторной батареи при напряжении 236,2 В и питание статической нагрузки током на входе инвертора, равным 52,1 А. Напряжение на выходе инвертора составляло 231 В, ток на выходе инвертора, обусловленный статической нагрузкой, — 15,9 А, что соответствует нагрузке инвертора на 10,5% номинальной мощности.

Через 10,0 с от момента начала эксперимента запускали асинхронный двигатель, подключенный к инвертору. Наибольший выходной ток инвертора, включающий пусковой ток двигателя и ток статической нагрузки, равнялся 298 А, при номинальном токе инвертора 152 А, см. рис. 3. Пуск двигателя вызвал провал напряжения на выходе инвертора до 151,8 В, т. е. 69% номинального напряжения, продолжительность провала — 34 мс, затем напряжение восстанавливалось до номинального. За 1,1 с двигатель разворачивался до номинального скольжения, а в 11,5 с был отключен. Такой режим работы имитировал управление группой технологических задвижек.

В соответствии с [4] глубина провалов напряжения на клеммах электроприемников собственных нужд АЭС допускается в пределах 30% номинального напряжения при продолжительности не более 200 мс.



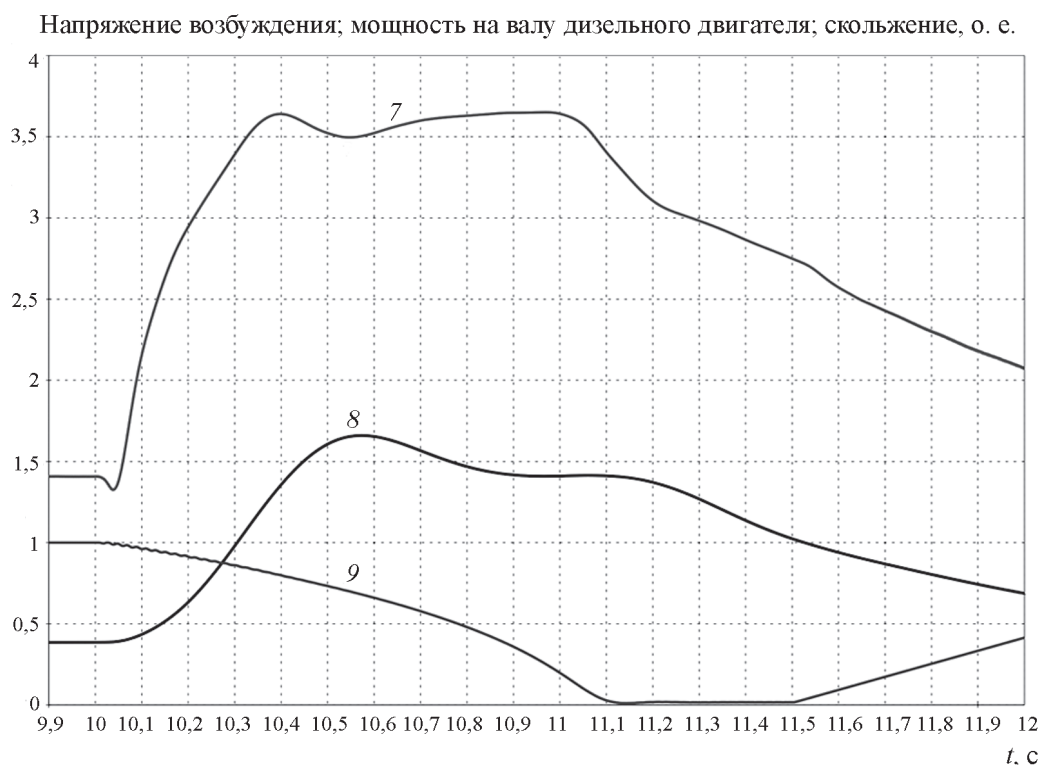


Рис. 3. Результаты расчета пуска двигателя:

1, 3 — среднеквадратичные напряжение и ток на выходе инвертора; 2, 4 — средние напряжение и ток на входе инвертора; 5, 6 — средние токи на выходе выпрямителя и аккумуляторной батареи; 7 — среднее напряжение возбуждения генератора ДГУ; 8 — мощность на валу дизельного двигателя; 9 — скольжение ротора электродвигателя

Следовательно, пуск двигателя может вызывать сбой в работе электроприемников, входящих в состав статической нагрузки.

В [2] определены требования к качеству переходных процессов, вызванных резким набросом или сбросом нагрузки, в виде границ зоны допустимых значений провалов и выбросов напряжений от их продолжительности для трех классов установок бесперебойного питания. На рис. 4 приведена характеристика допустимых изменений напряжения для установок бесперебойного питания третьего класса.

Результаты моделирования показали, что моделируемая система удовлетворяет требованиям, согласно [2], лишь третьего класса. Требования по провалам напряжения, соответствующие второму и первому классу, представляются чрезмерно высокими.

Пуск двигателя вызывает резкое увеличение тока во входной цепи инвертора до 708 А, см. рис. 3. Это приводит к снижению выходного напряжения выпрямителя до 203 В, что соответствует 92% номинального напряжения. В начале пуска аккумуляторная батарея принимает на себя большую часть возросшей нагрузки. Ток в цепи батареи через 75 мс после начала пуска равен 429 А, а в цепи выпрямителя в этот же момент времени — 276 А. Под действием регуляторов выпрямителя напряжение на его выходе увеличи-

вается и через 0,375 с после начала пуска достигает 220 В. При этом по мере восстановления напряжения токи между выпрямителем и аккумуляторной батареей перераспределяются: ток выпрямителя нарастает до номинального, а ток АБ — снижается. Параметры провала напряжения на сборке постоянного тока САЭ определяются динамическими характеристиками выпрямителя и внутренним сопротивлением АБ. Продолжительность провала напряжения на выходе выпрямителя значительно больше, чем на выходе инвертора, что обусловлено процессами перехода аккумуляторов из режима разряда в режим заряда и инерционностью регуляторов. Максимальная мощность, потребляемая инвертором при пуске двигателя, достигает 150 кВт. Это более чем в два раза превышает активную мощность нагрузки, что объясняется большим потреблением двигателем реактивной мощности при его пуске.

В соответствии с [5] допустимая глубина провалов напряжения на клеммах технических средств систем оперативного постоянного тока электростанций составляет 30 и 60% номинального напряжения при продолжительностях, не превышающих 1 и 100 с соответственно.

Пуск двигателя не приводит к провалу напряжения ниже 90% от номинального на выходе выпрямителя,

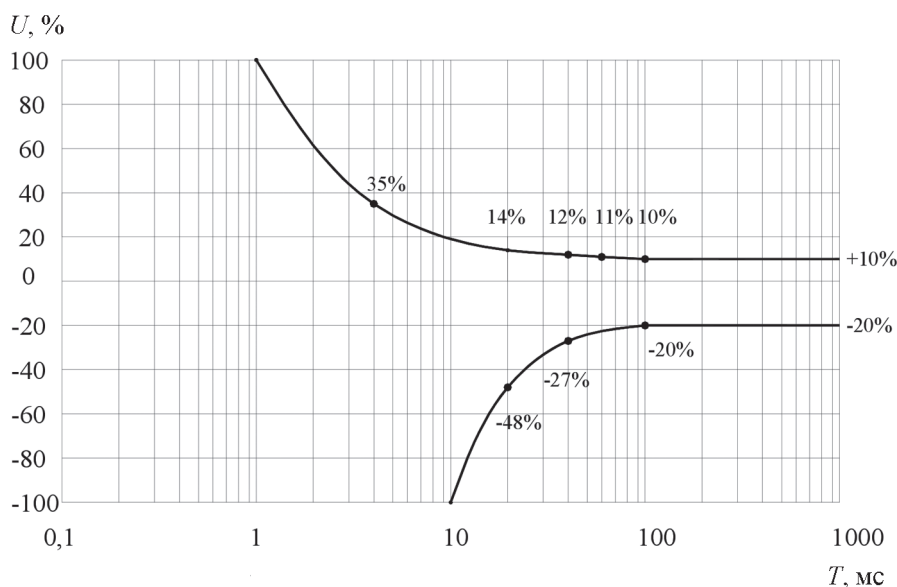


Рис. 4. Допустимые значения провалов и выбросов напряжения для установок бесперебойного питания третьего класса [2]:

U — напряжение; T — продолжительность возмущения

а следовательно и сбоям в работе электроприемников постоянного тока.

Ток дизель-генератора увеличивается с 84,2 А при работе на статическую нагрузку до 352 А во время пуска двигателя. При этом образуется провал напряжения до 187 В, что составляет 85% от номинального; его продолжительность — 0,65 с. Ввиду малой глубины провала, пуск двигателя не вызывает сбоев в работе электроприемников, подключенных к шинам ДГУ.

Таким образом, результаты исследования переходных процессов в САЭ показали, что требования по ЭМС, содержащиеся в [5], неоправданно жесткие, их трудно обеспечить в реальных системах.

Глубину и продолжительность провалов напряжения в САЭ целесообразно нормировать на основе [6], допускающего провалы в 30 и 60% при продолжительности в 1 и 0,5 с, соответственно.

Исследования переходных процессов в САЭ с выпрямителями и инверторами, использующими современную элементную базу силовых ключей и цифровые регуляторы, следует продолжить для обновления действующих и разработки новых национальных и отраслевых стандартов.

Литература

1. NEA/CSNI/R(2009)10. Defence in Depth of Electrical Systems and Grid Interaction. Final DIDEISYS Task Group Report. Nuclear Energy Agency, 2009
2. IEC 62040-3. Uninterruptible power systems (UPS). Pt. 3: Method of specifying the performance and test requirements.
3. НП-087-11. Требования к системам аварийного электроснабжения атомных станций.
4. ГОСТ 32137—2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Технические средства для атомных станций. Требования и методы испытаний.
5. ГОСТ Р 51317.6.5—2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств применяемых на электростанциях и подстанциях. Требования и методы испытаний.
6. IEC 61000-4-11. Electromagnetic compatibility (EMC). Pt. 4 — 11: Testing and measurement techniques. Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.

Статья поступила в редакцию 09.12.2014