

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА

ШАВАРИН Н. И., канд. тех. наук., заведующий отделом НКУ ООО НПП «ЭКРА»

ИВАНОВ И. С., инженер отдела НКУ ООО НПП «ЭКРА»

Надежность системы оперативного постоянного тока (СОПТ), обеспечение селективности срабатывания защитных аппаратов, обеспечение заданных колебаний напряжений при включении и отключении определяет схема СОПТ. В статье рассмотрен принцип построения модели системы оперативного постоянного тока. На основе составленной модели получены кривые переходных процессов, протекающих в сети постоянного тока при трех различных способах включения.

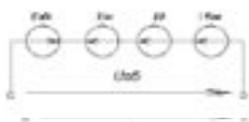


Рис. 1. Схема замещения АБ

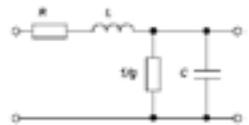


Рис. 2. Схема замещения силового электрического кабеля

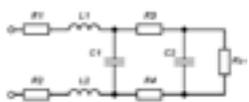


Рис. 3. Схема замещения терминала

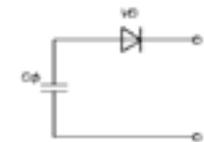


Рис. 4. Схема замещения зарядного устройства

Надежность работы подстанции напрямую зависит от надежности работы системы оперативного тока. Поэтому исследование процессов и явлений, протекающих в распределенной энергосети постоянного тока – необходимый фактор при разработке как проекта подстанции, так и рекомендаций по ее эксплуатации. Далее приводятся различные способы включения системы, их достоинства и недостатки. Исследование протекающих при этом переходных процессов основывается на моделировании части системы оперативного тока, установленной на подстанции (рис. 5). Модель представлена в виде обыкновенных схем замещения основных элементов системы: аккумуляторной батареи, силового электрического кабеля, потребителя (терминала защиты) и зарядного устройства.

Аккумуляторная батарея (АБ) замещается четырьмя последовательно соединенными источниками ЭДС

(рис. 1), значения которых являются функциями от множества параметров, таких как плотность тока, температура, остаточный заряд и др.

Здесь $E_{\text{АДС}}$ – ЭДС аккумуляторной батареи, $E_{\text{ЕХ}}$ – электрохимическая поляризация, $E_{\text{Д}}$ – диффузионная поляризация, $R_{\text{ВН}}$ – внутреннее сопротивление АБ. Выражения для вычисления этих параметров АБ даны в [2].

На рис. 2 изображена схема замещения силового кабеля. Индуктивность и емкость находятся из [4] и [3], соответственно.

Здесь R – активное сопротивление кабеля, L – индуктивность кабеля, C – емкость кабеля, g – проводимость изоляции кабеля.

Модель терминала защиты представляет собой немного упрощенную электрическую схему фильтра П1410 (производство НПП «ЭКРА»), на выходе которого подключено сопротивление $R_{\text{Э}}$ (рис. 3). Это сопротивление эквивалентно нагрузке, которую



Шаварин Николай Иванович
Организация: ООО НПП «ЭКРА»
Должность: Заведующий отделом НКУ, к.т.н.
Образование: В 1977 году окончил ЧГУ (Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова) по специальности «Инженер-электрик». В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Московском энергетическом институте (Техническом университете)



Иванов Иван Сергеевич
Организация: ООО НПП «ЭКРА»
Должность: Инженер отдела НКУ
Образование: В 2009 году окончил ЧГУ (Чувашский государственный университет им. И.Н.Ульянова) по специальности «Инженер-электрик»

Бесплатная электронная версия журнала предоставлена компанией . Другие номера журнала на сайте редакции:

представляет собой терминал БЭ2704 (производство НПП «ЭКРА»). На базе этого терминала строятся шкафы ШЭ2710 (также производство НПП «ЭКРА»). При моделировании сделано допущение, что все потребители – это эти терминалы. Сопротивления R_1 – R_4 , индуктивности L_1 , L_2 и емкости C_1 , C_2 – относятся к части схемы, заменяющий фильтр П1410.

На рис. 4 показана схема замещения зарядного устройства. Здесь принято допущение, что ЗУ предположительно не успеет отреагировать на изменение напряжения на фильтре СФ и токов ЗУ и АБ за время переходных процессов.

На рис. 5 изображена функциональная схема моделируемой части СОПТ ПС 500 кВ, в которую включены два ЗУ, одна АБ, один шкаф отходящих линий (ШОЛ), три шкафа распределения оперативного тока (ШРОТ) и один шкаф центральной сигнализации (ШЦС). Щит постоянного тока (ЩПТ) состоит из шкафа ввода (ШВ) и шкафа отходящих линий (ШОЛ).

Рассмотрим первый способ включения. На рис. 6 изображена расчетная схема модели, имитирующей включение ШОЛ с подключенными к нему тремя ШРОТ, к каждому из которых подключено по 24 терминала, и один терминал, который моделирует шкаф центральной сигнализации. Линии Л1–Л4 имеют длину 20 м и сечение токопроводящей жилы 150 мм². Диоды, используемые в расчетной схеме, являются идеальными. На рис. 7 показана модель расчетной схемы, собранной в среде Simulink пакета MatLab. Здесь Accumulator Battery – это блок, моделирующий аккумуляторную батарею. Блоки ZU1 и ZU2 моделируют зарядные устройства. Блоки L1–L6 моделируют силовые кабели, а блоки 76P, 78P, 91P и CSig моделируют кабельные линии с нагрузкой. Switch, Switch1 и Switch2 являются идеальными ключами, служащими для коммутации электрических цепей. Элементы V1–V5 служат для измерения напряжения.

На рис. 8 показаны результаты моделирования. В момент времени $t=0,5$ с происходит замыкание ключей Switch1 и Switch2, которые и подключают распределенную сеть с потребителями в виде терминалов. На рис. 8 видно,

что происходит возрастание тока, потребляемого всеми потребителями, которое связано с зарядом емкостей фильтров C1 и C2 (рис. 3), через которые подключены терминалы защит. Напряжение на входе фильтра при достижении максимума (400 В) начинает медленно падать до 220 В, что связано с тем, что емкости фильтра из-за наличия диода VD2 (рис. 6) могут разряжаться только через RЭКВ.

Напряжение на шине при подключении нагрузки имеет высокочастот-

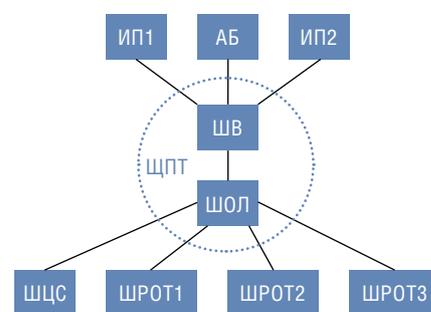


Рис. 5. Функциональная схема моделируемой части СОПТ ПС 500 кВ

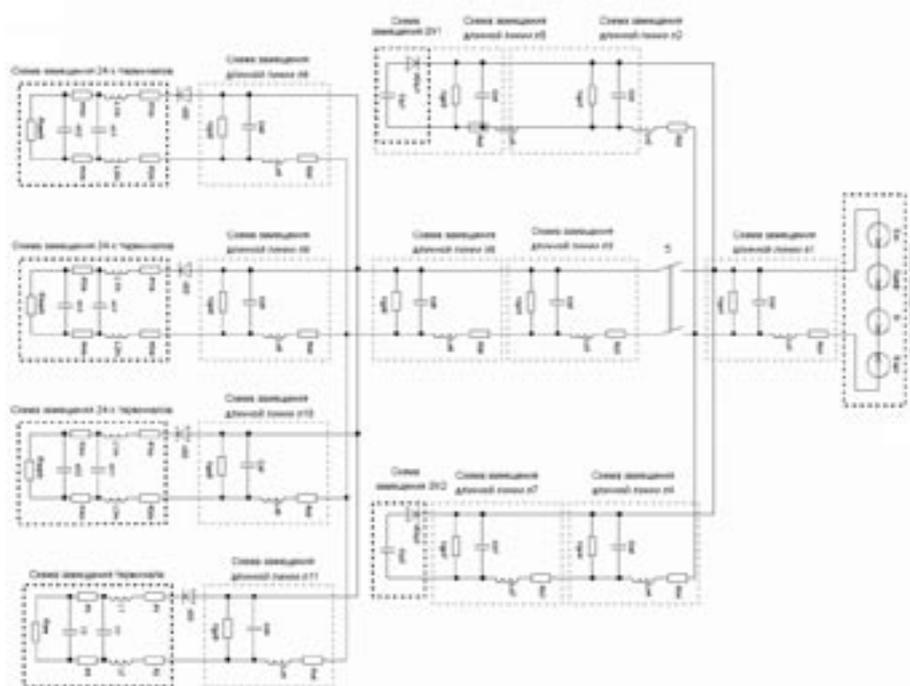


Рис. 6. Расчетная схема модели, имитирующей первый способ включения СОПТ

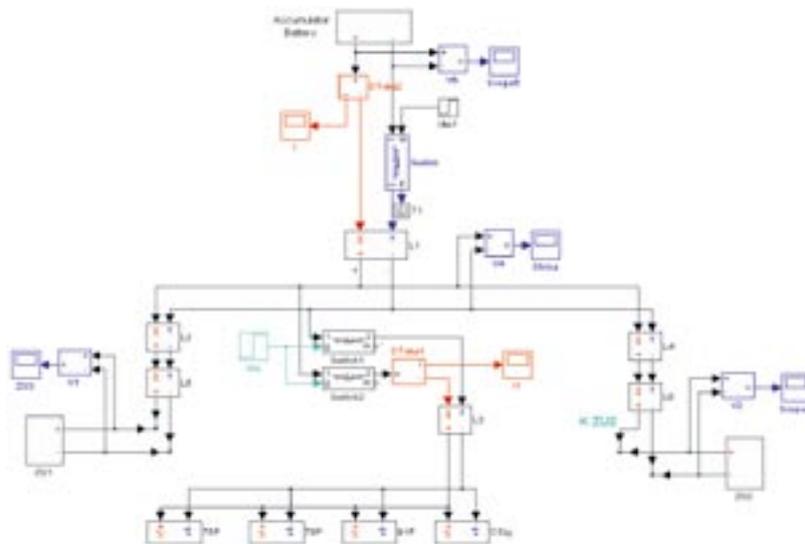
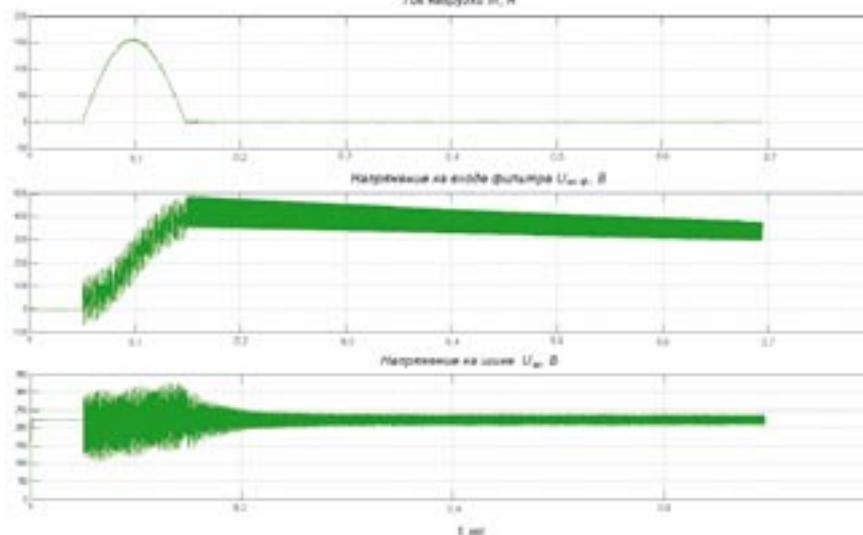
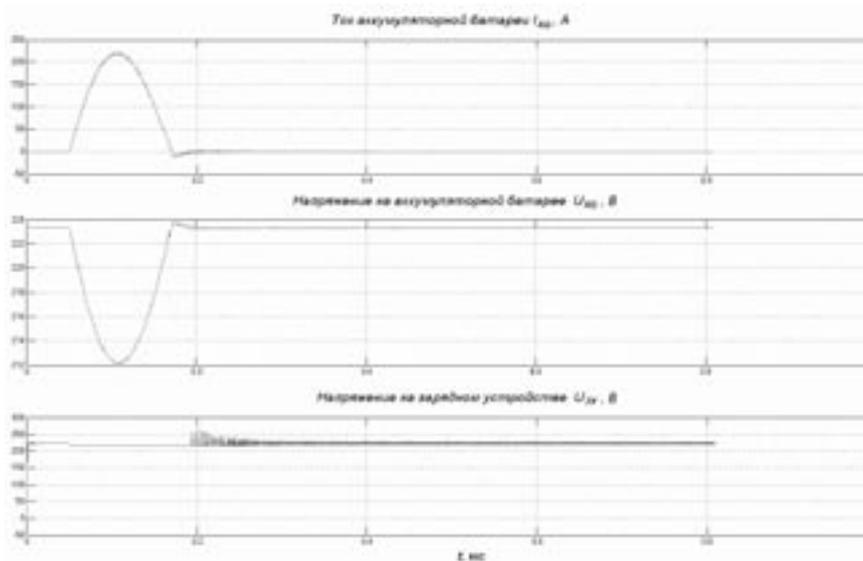
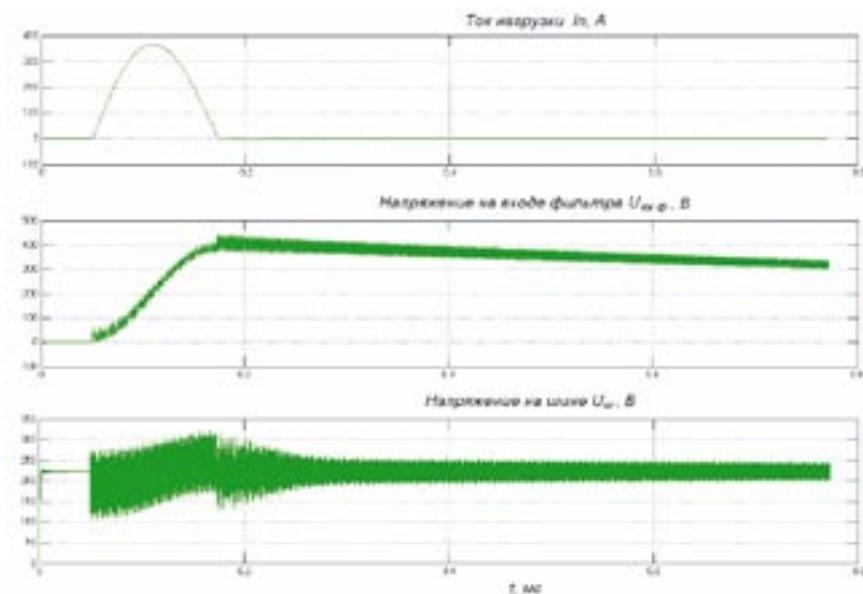


Рис. 7. Внешний вид модели, собранной в среде Simulink пакета MatLab



ные колебания, амплитуда которых достигает 70–80 В.

При подключении нагрузки пиковое значение тока АБ достигает 220 А, что существенно меньше пикового значения тока, потребляемого нагрузкой. Разность обеспечивается за счет двух ЗУ. Также наблюдается существенная просадка напряжения на АБ с 223,5 до 212 В, связанная с большим током разряда. Напряжение на ЗУ имеет незначительные высокочастотные колебания, которые постепенно затухают.

Рассмотрим второй способ включения, когда включается нагрузка с одного ШРОТ, т.е. нагрузка фактически в три раза меньше, чем в первом случае. Расчетная схема такая же, как и на рис. 6, но в нагрузке только одна схема замещения 24 терминалов. На рис. 10 и 11 показаны кривые напряжений и токов, полученные при помощи модели, собранной в среде Simulink. Пиковое значение тока нагрузки достигает 150 А (рис. 10), что в три раза меньше, чем при первом способе включения. Уменьшение тока связано с уменьшением включаемых в сеть постоянного тока терминалов с 73 до 24 штук. Как и в первом случае, присутствуют колебания напряжения на входах фильтров и на шине (место соединения АБ, ЗУ и нагрузки). Пиковое значение тока разряда АБ теперь достигает только 100 А, что в два раза ниже, чем при первом случае. Просадка напряжения на АБ составляет только 5 В.

Рассмотрим теперь последний способ включения, когда идет включение одного терминала. Расчетная схема – это схема на рис. 6, где в нагрузке только схема замещения одного терминала. При таком способе включения пиковое значение тока нагрузки (рис. 12) достигает только 15 А, что гораздо меньше, чем в первом и втором случаях. Однако повышение напряжения на входе фильтра в два раза остается. Следует отметить значительное уменьшение колебаний на входе фильтра и на шине.

Рис. 8. Ток на выходе ЦПТ и напряжения на входе фильтра и в точке подключения АБ, зарядных устройств и нагрузки

Рис. 9. Ток АБ, напряжения на АБ и ЗУ

Рис. 10. Ток на выходе ЦПТ и напряжения на входе фильтра и в точке подключения АБ, зарядных устройств и нагрузки

Пиковое значение тока разряда АБ теперь составляет только 15 А, а падение напряжения – всего 0,7 В. При этом существенно снижена величина колебаний напряжения на выходе ЗУ.

Проверим адекватность модели реальному объекту. На рис. 16 изображена расчетная схема модели, которая моделирует реальную экспериментальную установку (рис. 17). Экспериментальная установка представляет собой аккумуляторную батарею с подключенным к ее зажимам кабелем ПВЗ с сечением токопроводящих жил 95 мм² и длиной 50 м. К концу кабеля подключен резистор номиналом 2,2 кОм. Параметры модели приведены к реальным. На рис. 18 показана осциллограмма напряжения на резисторе R_n (рис. 17), а на рис. 19 – кривая напряжения, полученная при помощи модели.

Из рисунков 16 и 17 видно, что качественно графики схожи, однако есть существенное различие. Колебания в реальной кривой напряжения затухают гораздо быстрее, чем в кривой, полученной с помощью модели. Данное несоответствие связано с тем, что при составлении модели были приняты следующие допущения: модель длинной линии не учитывает эффект вытеснения тока в проводнике, увеличение потерь в изоляции при высокочастотных колебаниях. Также модель силового кабеля не учитывает потери на электромагнитное излучение.

Итак, считаем, что модель СОПТ вполне адекватна объекту. Однако, учитывая при этом вышеуказанный недостаток модели, можно сказать, что возрастания напряжения на входах фильтров при всех случаях включения нагрузки, скорее всего, не будет из-за быстрого затухания колебаний в сети постоянного тока. Это подтверждает кривая напряжения (рис. 18), снятая с экспериментальной установки (рис. 15), где резистор был подключен через фильтр П1410 и диод.

Из рассмотренных трех случаев наиболее приемлемым является третий, когда к СОПТ подключается только один терминал. Это связано с тем, что

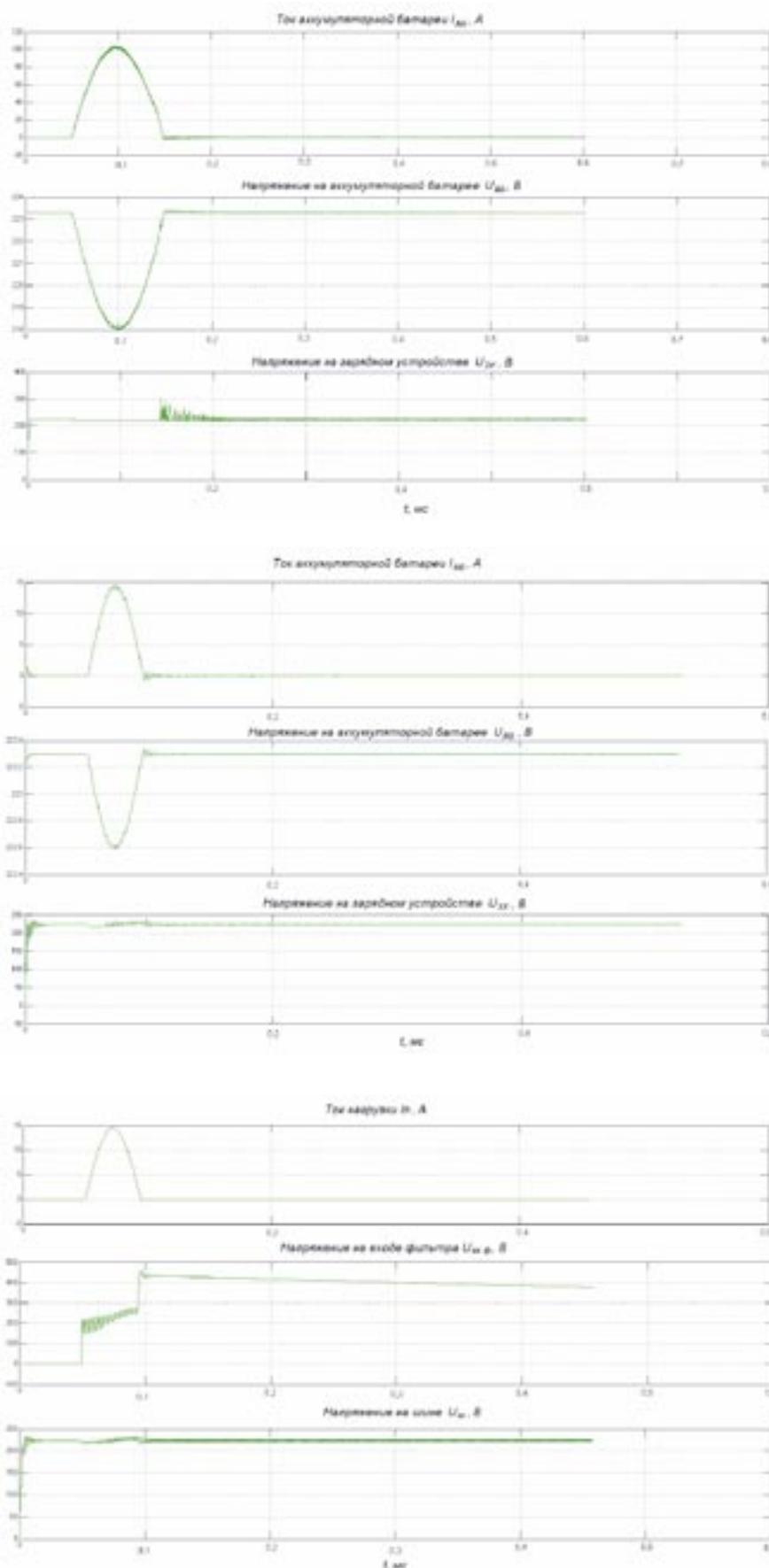


Рис. 11. Ток АБ, напряжения на АБ и ЗУ

Рис. 12. Ток на выходе ЩПТ и напряжения на входе фильтра и в точке подключения АБ, зарядных устройств и нагрузки

Рис. 13. Ток АБ, напряжения на АБ и ЗУ

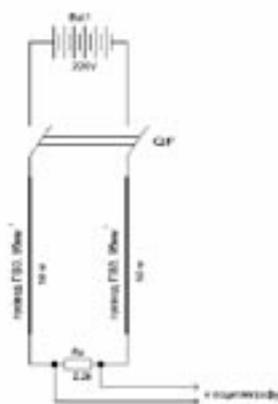


Рис. 14. Расчетная схема модели

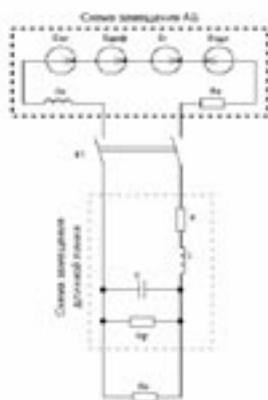


Рис. 15. Схема для экспериментального подтверждения адекватности модели

при таком включении будут присутствовать сравнительно с двумя другими случаями небольшие значения токов нагрузки, а также практически полное отсутствие пульсаций на входе ЗУ и точке соединения кабелей АБ, ЗУ и нагрузки. Также, исходя из результатов моделирования, можно утверждать, что

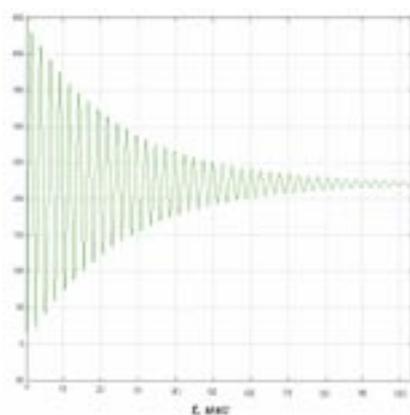
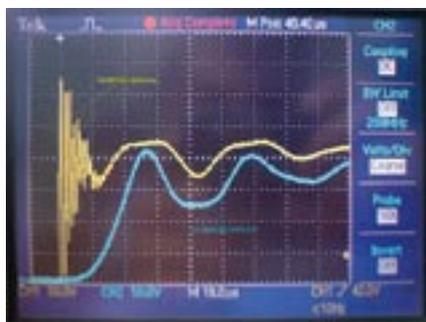
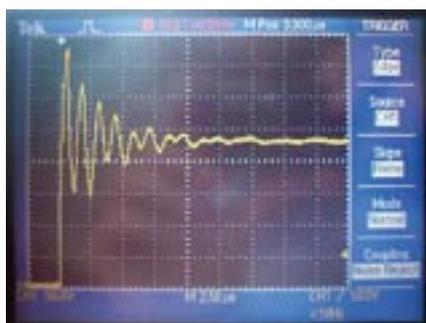


Рис. 16. Осциллограмма напряжения на резисторе Rn

Рис. 17. Кривая напряжения на резисторе Rn, полученная при помощи модели

Рис. 18. Кривые напряжений на входе и выходе фильтра



в СОПТ имеют место высокочастотные колебания напряжения, связанные с волновыми процессами, протекающими в распределенных кабельных линиях. Поэтому, каждый потребитель, чувствительный к таким помехам, должен подключаться к системе через фильтр.

В дальнейшем с помощью модели будут изучаться и другие режимы работы СОПТ, что позволит выбрать наиболее оптимальную с точки зрения надежности схему ее построения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Том 2/ К.С. Де-

мирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – 4-е изд., перераб. и доп. – Питер, 2004. – 457 с.: ил.

2. Коровин Н.В. Электрохимическая энергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264 с.: ил.

3. Иоссель Ю.Я. Расчет электрической емкости/ Ю.Я. Иоссель, Э.С. Кочанов, М.Г. Струнский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 288 с.: ил.

4. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.

КОММЕНТАРИЙ ЭКСПЕРТА

АНТОНОВ Л.Е., начальник отдела РЗА и ВК ООО «Высоковольтные энергетические системы»

Авторами статьи предложено исследование процессов, протекающих в системах оперативного постоянного тока (СОПТ), методом математического моделирования. Как и всякое моделирование сложного процесса, эффективность предложенного метода будет зависеть от степени точности создаваемой модели. В конкретном случае, с цепями постоянного тока подстанций, сложность моде-

лирования будет заключаться в учете и электрических, и электрохимических, и электромагнитных процессов. Использование только этого метода было бы либо очень трудоемко в части создания модели, отражающей все процессы достаточно достоверно, либо результаты расчетов на этой модели были бы весьма приближенными. Если же результаты этих расчетов будут дополнены натурными испытания-

ми на реальном оборудовании, то мне кажется, что в применении к цепям постоянного оперативного тока подстанций именно это сочетание двух методов поможет решить все насущные проблемы проектирования этих систем. Такую уверенность дают реальная возможность и невысокая стоимость затрат проведения подобных испытаний, если проведение их будет нацелено на конкретную проблему,

выявленную в результате исследования математической модели.

Авторами статьи подмечена одна существенная особенность проектирования СОПТ – сложность этого процесса и необходимость учета множества факторов, влияющих на надежность СОПТ. К таким факторам можно отнести и удобство эксплуатации, и влияние конфигурации системы на помехозащищенность (свою собственную и питаемых устройств), и понимание электрохимических процессов, протекающих в аккумуляторной батарее, и учет устройств по разным уровням надежности и т.п. Влияние каждого из этих факторов на надежность СОПТ – это тема для отдельных статей. В предыдущем номере журна-

ла «Энергоэксперт» уже были затронуты некоторые из них. Предложенную статью можно рассматривать, как продолжение этих публикаций.

Авторы рассматривают характер коммутационных возмущений, протекающих при операциях с автоматическими выключателями и предохранителями системы. В статье рассмотрен только один из примеров сложных переходных процессов, протекающих в СОПТ, – подача напряжения на блоки питания микропроцессорных терминалов. Приведены данные экспериментального подтверждения адекватности модели. Этим примером авторами статьи дан метод и показана возможность решения и остальных задач разработки и проектирования СОПТ.

В заключение хочется сказать, что в дальнейшем для более быстрого решения создания типовых решений по СОПТ необходима формулировка списка всех нерешенных вопросов. Необходимо постановка этих задач, в которой должны принять участие не только организации – разработчики СОПТ, не только проектные организации, но и эксплуатирующие организации. Без этой работы многие технические требования к СОПТ будут носить волюнтаристический характер и не будут способствовать выработке оптимального решения. А конструкторам СОПТ, считающим, что проектирование этих систем можно свести только к расчету количества отходящих фидеров от щита постоянного тока, лучше не браться за эту проблему.

ПРИГЛАШАЕМ ЭКСПЕРТОВ К ДИСКУССИИ

Пожалуйста, направляйте ваши комментарии и замечания по данному материалу и другим материалам номера в адрес ответственного редактора по электронной почте aao@energyexpert.ru

VIII Форум «Современные Технологии Промышленной Автоматизации. АСУТП объектов энергетики»

Форум проводится для технических руководителей, инженеров и начальников отделов АСУ объектов тепло- и электроэнергетики, представителей проектных и наладочных предприятий, учебных организаций, а также системных интеграторов, работающих в области АСУТП, АСДУ, АСКУЭ на рынке энергетики. С докладами выступают представители ведущих инжиниринговых и проектных компаний, производителей технологического оборудования и систем автоматизации для ТЭС, котельных и электросетевых предприятий.

Основные вопросы Форума 2009:

1. Рынок производителей технологического и электротехнического оборудования для объектов энергетики. Анализ основных тенденций.
2. Проблемы автоматизации объектов энергетики. Состояние рынка в условиях кризиса.
3. Рынок комплексных АСУТП для предприятий теплоэнергетики. Обзор экономической и технологической составляющей. Комплексная АСУТП ТЭС на примере ПТК нового

поколения «Торнадо-N».

4. Проектирование и наладка систем автоматизации для предприятий энергетики.
5. «Локальная» автоматизация объектов энергетики. Типовые решения для АСУТП отдельных узлов ТЭС и других промышленных предприятий.
6. АСДУ, автоматизация объектов электроэнергетики, АСУТП подстанций, телемеханика, РЗА, комплексы противоаварийной автоматики, АСКУЭ.
7. Новости рынка промышленных контроллеров. Презентация российских и иностранных аппаратно-программных средств для создания АСУТП для объектов энергетики и других промышленных объектов.

Подробную информацию можно получить на странице Форума <http://www.tornado.nsk.ru/forum2009>. Регистрация участников и аккредитация СМИ по телефону: (383) 36 33 800, 36 33 900 или электронной почте: marketing@tornado.nsk.ru.



VIII Международный Форум
Современные Технологии Промышленной Автоматизации
АСУТП объектов энергетики



6–7 октября 2009 г., Новосибирск

