



УДК 621.039.56

В.Д. Самойлов, д-р техн. наук
Ин-т проблем моделирования
в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины
(Украина, 03164, Киев, ул. Генерала Наумова, 15,
тел. (044) 4241063, e-mail: samoylov.vd@gmail.com),

Р.П. Абрамович
Акционерное общество «ЛьвовОРГРЭС»
(Украина, 79011, Львов, ул. Тютюнников, 55,
тел. (032) 2760148, e-mail: romanabramovych@gmail.com)

Поиск токов в коммутационных структурах электрических подстанций для моделей тренажеров оперативных переключений

Предложена модель коммутационной структуры (КС) электрической подстанции для тренажеров оперативных переключений, позволяющая определять напряжение в узлах и токи, проходящие через элементы КС. Токи в эквивалентных электрических цепях и псевдонулевые ребра КС определяются в результате решения системы линейных алгебраических уравнений.

Запропоновано модель комутаційної структури (КС) електричної підстанції для тренажерів оперативних перемикачів, яка дозволяє визначати напругу в вузлах і струми, що проходять через елементи КС. Струми в еквівалентних електричних колах та псевдонульові ребра в КС визначаються в результаті розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационные технологии, коммутационная структура, конструирование тренажеров и моделей.

Важными компонентами электроэнергетической системы (ЭЭС), влияющими на надежность и безопасность ее эксплуатации, являются электрические подстанции (ПС), с помощью которых обеспечивается управление подключением и отключением потребителей, защита от аварийных ситуаций. Эффективность эксплуатации ПС определяется в значительной степени уровнем компетентности ее персонала.

Работу ПС обеспечивают:

диспетчерский персонал, в функции которого входят контроль и управление ПС в составе ЭЭС;

дежурный оперативный персонал, осуществляющий оперативные переключения;

© В.Д. Самойлов, Р.П. Абрамович, 2013

ремонтный и рабочий персонал, обеспечивающий обслуживание оборудования ПС и поддержание его в рабочем состоянии.

Важной составляющей обучения и поддержки квалификации диспетчерского и оперативного персонала является тренажерная подготовка. Использование мультимедийных тренажеров оперативных переключений (ТОП) дает возможность проводить такую подготовку для отработки действий персонала в нормальных и аварийных ситуациях.

Основой ТОП является модель коммутационной структуры ПС, отображающая действия тренируемого по переключениям коммутационных элементов (КЭ). Для каждого состояния коммутационной структуры модель должна определять наличие напряжений на КЭ (в местах их соединения) и токи, проходящие через КЭ, на входах (вводах ПС) и выходах (нагрузках). Тренажер оперативных переключений является ситуационным. Его модель воспроизводит набор состояний коммутационной структуры, в каждое из которых она переходит в результате действий пользователя. В промежутках между действиями пользователя никаких изменений состояния не происходит.

Несмотря на отсутствие технологических требований к отображению в модели переходных процессов важным является учебно-психологическое требование — комфортное время отклика модели на внешнее воздействие. Значительное время отклика уменьшает учебный эффект тренажерной подготовки. Комфортное для тренируемых время отклика модели сцены не должно превышать 5 с. Если коммутационная структура ПС содержит значительное число КЭ, то необходимы такие алгоритмы, которые обеспечат комфортное время отклика модели.

Рассмотрим метод определения токов в коммутационной структуре с помощью представления этой структуры в виде эквивалентной электрической цепи. Анализ эффективности выбранного метода решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), описывающих такую цепь, позволит сделать вывод о допустимой размерности коммутационной структуры.

Подстанции, показанные на рис. 1, входят в состав ЭЭС на уровне распределительных сетей. На узлы вводов подается высокое напряжение (330, 220, 110, 35 кВ), которое затем преобразуется в напряжение, подаваемое потребителям (10, 6 кВ).

Основное оборудование ПС: силовые трансформаторы; коммутационное оборудование; системы шин и линий; линии, отходящие к потребителям (нагрузка); измерительное и вспомогательное оборудование (системы дистанционного управления, автоматики, защиты, устройства телемеханики и телеметрии, оборудование для собственных нужд).

Модельное представление объекта. Объект расчета — это коммутационная структура электрической ПС, в которой КЭ являются выключа-

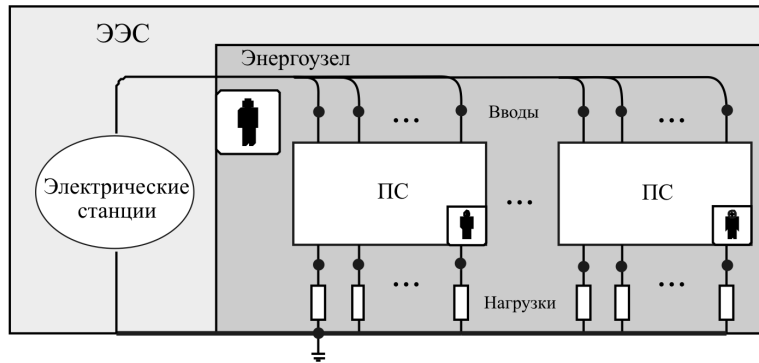


Рис. 1. Подстанции в составе ЭЭС

тели и разъединители. Определение наличия напряжений в узлах коммутационной структуры — относительно простая задача, алгоритм решения которой приведен в [1] с использованием [2]. Эффективность алгоритма определения узлов под напряжением линейно зависит от числа узлов V и числа дуг E : $\Theta(V + E)$.

Более сложной является задача определения токов через КЭ коммутационной структуры (наличие токов и (или) их значений). Необходимость расчета токов в компонентах коммутационной структуры РС возникает в связи с реализацией на модели следующих задач:

1. Недопустимость проведения операций с разъединителем, по которому проходит ток (имеет значение наличие или отсутствие тока).
2. Срабатывание автоматики при превышении допустимых токов в выключателях, трансформаторах и другом оборудовании.
3. Отображение значений токов на показывающие приборы в различных местах РС.

В задачах 2 и 3 требуется определение не только наличия или отсутствия тока, но и его конкретного значения, определяемого нагрузками, которые находятся вне РС и на уровне РС не могут быть определены, но могут быть добавлены для конкретных тренировок из базы данных.

При сценарно-педагогическом подходе¹ к созданию тренажеров ТОП может быть реализован с помощью одной сцены. Фоном сцены (декорацией) является мнемосхема РС. Коммутационные элементы (компоненты) размещены на мнемосхеме и соединены в узлах. Каждому вхо-

¹ Создание тренажеров в виде сценарных структур, сцены и модели сцен которых выбираются исходя из требований организации учебно-тренировочного процесса в объеме Должностных инструкций обучаемых.

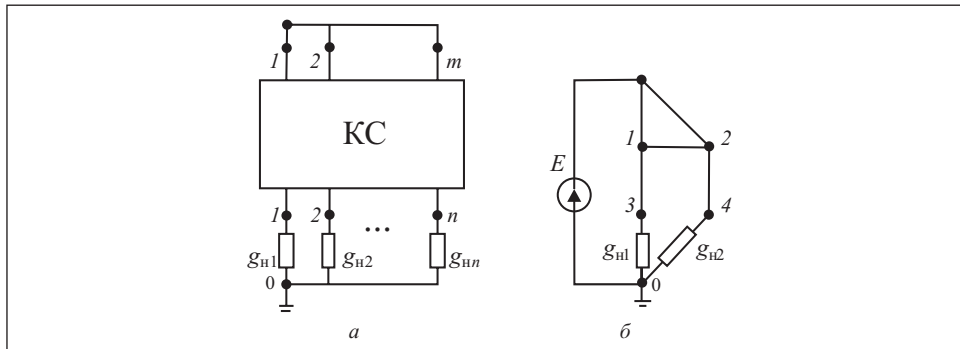


Рис. 2. Коммутационная структура ПС с внешними нагрузками (а) и пример простой коммутационной структуры (б)

дющему в коммутационную структуру экземпляру компонента соответствует набор параметров. Например, для КЭ — это «имя», «индекс» (место в коммутационной структуре), «состояние» (включен, выключен).

Узлы соединений КЭ размечаются неповторяющимися числовыми значениями ($i=1, 2, \dots, n$). Все вводы напряжений на ПС объединены в один узел. Узлы подключения к ПС нагрузок, включаемых в модель расчета коммутационной структуры, участвуют в числовой разметке. Общие концы нагрузок — узел 0 (СТОК).

Методы определения наличия токов в дугах коммутационной структуры с помощью представления ее в виде эквивалентной электрической цепи. Электрическая цепь с проводимостями внешних нагрузок. Токи в коммутационной структуре определяются внешними нагрузками (рис. 2, а). На значения токов влияют сопротивления самих КЭ и эквивалентная проводимость трансформаторов. Влияние потерь в трансформаторах на распределение токов в коммутационной структуре рассмотрим далее. Потери на шинах и линиях в составе ПС можно пренебречь. Пусть электрическая схема, эквивалентная коммутационной структуре, содержит только сопротивления КЭ.

Согласно паспортным данным сопротивление КЭ имеет диапазон 10^{-4} — 10^{-5} Ом (проводимость 10^4 — 10^5 См). Рассчитываемая электрическая цепь кроме проводимостей КЭ содержит проводимости внешних нагрузок. При заданных токах нагрузок I_{ni} или мощностей P_{ni} и заданном напряжении U_{ni} на них определим эти проводимости для модельного эквивалента в виде цепи постоянного тока: $g_{ni} = I_{ni} / U_{ni}$ или $g_{ni} = P_{ni} / U_{ni}^2$.

Для расчета цепи постоянного тока методом узловых напряжений получаем систему алгебраических уравнений $GU = J$, где G — матрица

проводимостей цепи; J — вектор входных токов; U — искомый вектор узловых напряжений. Матрица G симметрична относительно главной диагонали. Система линейных алгебраических уравнений $GU = J$ может быть решена одним из известных методов.

Ток в любом ребре i_{uv} определяем из выражения $i_{uv} = (x_u - x_v)/g$, где u и v — начало и конец ребра. Если нас интересует только наличие тока и его направление, то используем выражение $i_{uv} = \text{sign}(x_u - x_v)$.

Для эквивалентной схемы простой коммутационной структуры с двумя нагрузками (рис. 2, б) матрица A и вектор B имеют следующий вид:

$$A = \begin{pmatrix} 3g & -g & -g & 0 \\ -g & 3g & 0 & -g \\ -g & 0 & g+g_{н1} & 0 \\ 0 & -g & 0 & g+g_{н2} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} Eg \\ Eg \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

или, после деления A и B на g — проводимость КЭ,

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1+g_{н1}/g & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1+g_{н2}/g \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} E \\ E \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Следует обратить внимание на проблемы, возникающие при расчете такой эквивалентной электрической цепи:

1. Реальные значения проводимостей КЭ неизвестны и в соответствии с паспортными данными могут иметь разброс значений в диапазоне 10^4 — 10^5 См, что влияет на распределение фактических токов нагрузок между КЭ.

2. Максимальное (при КЭ от 10^4 до 10^5 См) и минимальное (при нагрузке от 10^{-4} до 10^{-5} См) значения проводимости в такой цепи отличаются в 10^9 — 10^{10} раз, что может привести к методической ошибке, определяемой разрядностью вычислений.

Электрическая цепь с токами внешних нагрузок. Рассмотрим вариант расчета коммутационной структуры, в котором нагрузки заданы не эквивалентными проводимостями, а токами $I_{ни}$. Базовый узел в модели для такого расчета (рис. 3, а) перенесен в узел объединения вводов (ИСТОК), а нагрузки представлены токами $I_{ни}$ ($i=1,2,\dots,n$). Напряжения в узлах в этом случае определяются относительно узла 0 (ИСТОК) и зависят от заданных токов нагрузок и проводимостей КЭ.

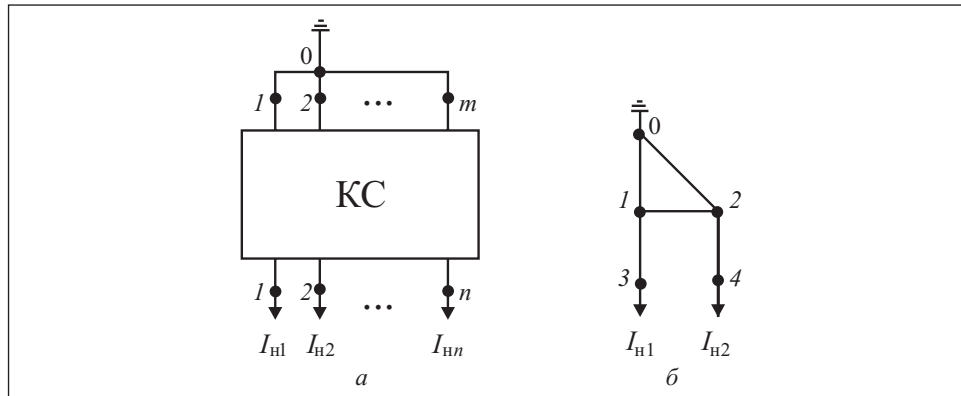


Рис. 3. Коммутационная структура ПС с токами внешних нагрузок (а) и пример простой коммутационной структуры (б)

Система линейных алгебраических уравнений для этой модели имеет вид $AX = B$, где

$$A = \begin{pmatrix} 3g & -g & -g & 0 \\ -g & 3g & 0 & -g \\ -g & 0 & g & 0 \\ 0 & -g & 0 & g \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -I_{н1} \\ -I_{н2} \end{pmatrix},$$

или, после деления A и B на g ,

$$A = \begin{pmatrix} 3 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -I_{н1}/g \\ -I_{н2}/g \end{pmatrix}.$$

Пусть $I_{н1} = 1000$, $I_{н2} = 1$, $E = 10^4$. Проводимости ребер соответствующих КЭ, включенных между узлами, одинаковы: $g = 10^4$. Проводимости нагрузок: $g_{н1} = I_{н1}/E = 0,1$, $g_{н2} = I_{н2}/E = 0,0001$. Рассчитав напряжения X в узлах и токи в ребрах при $g = 1$ и $g = 10^4$, получим следующие значения:

$$X = \begin{array}{c|c} g=1 & g=10^4 \\ \hline -667 & -0,0667 \\ -334 & -0,0334 \\ -1667 & -0,1667 \\ -355 & -0,0335 \end{array}.$$

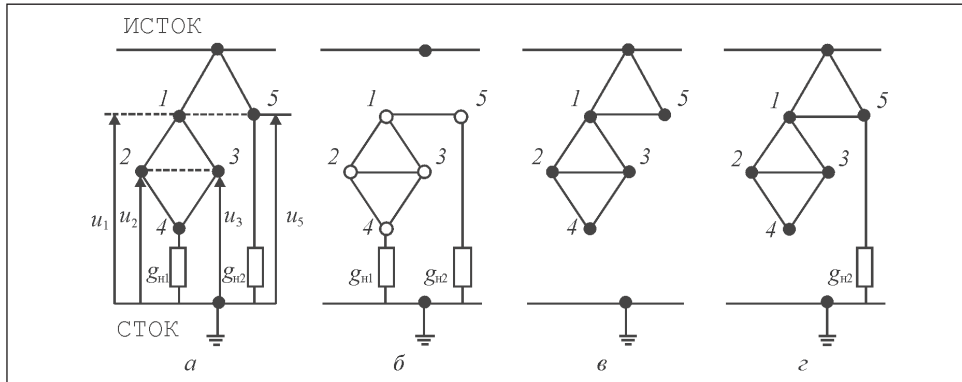


Рис. 4. Схемы коммутационной структуры с нулевыми и псевдонулевыми по току ребрами

Выявление нулевых и псевдонулевых по току ребер с помощью моделирования. Необходимым, но недостаточным условием наличия тока в ребре является наличие напряжений в узлах ребра. После отключения в исходной схеме (рис. 4, а) ребер от ИСТОКА к 1 и 5 (рис. 4, б) напряжения во всех узлах равны нулю и токи в структуре отсутствуют. Если же отключить в коммутационной структуре (см. рис. 4, а) ребра нагрузок от узлов 4 и 5 к СТОКУ, то во всех узлах напряжения будут одинаковы и токов в структуре не будет.

Алгоритм логического поиска, предложенный в [1], позволяет правильно определять отсутствие токов для вариантов, представленных на рис. 4, б и в. Однако, если в исходной схеме (см. рис. 4, а) отключить ребро нагрузки (4, СТОК), то в ребрах (1, 2), (1, 3), (2, 4) и (3, 4) (структура «гроздь») по этому алгоритму будет определено наличие токов, так как из узлов 1—4 есть пути, связывающие их с ИСТОКОМ и СТОКОМ. Это ошибочный результат, поскольку токи в ребрах отсутствуют. Решение соответствующей СЛАУ коммутационной структуры (рис. 4, г) позволяет правильно определить, что напряжения в узлах 1—4 одинаковы, поэтому в соединяющих их ребрах токи отсутствуют.

Расчет значений напряжений в узлах посредством решения СЛАУ и определение по ним значений токов в ребрах коммутационной структуры не решает в полном объеме задачу о наличии всех токов в ребрах. В некоторых ребрах вследствие одинаковых значений напряжений в узлах, которые они соединяют, токи становятся нулевыми. Такие ребра назовем псевдонулевыми.

Возможны два вида псевдонулевых ребер: структурные и зависящие от нагрузок (рис. 5). Ребро (2, 3) является структурным псевдонулевым,

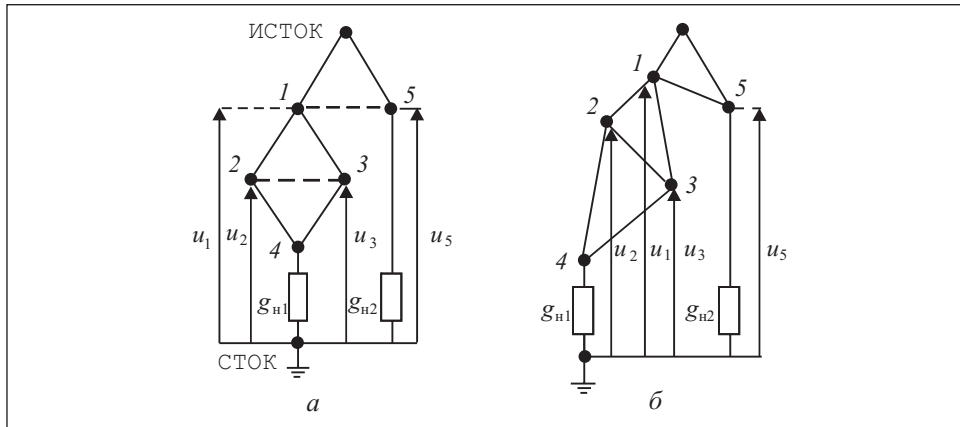


Рис. 5. Схема коммутационной структуры, имеющей ребра с псевдонулевыми токами (а), и «перекос» этой структуры (б)

так как при одинаковой эквивалентной проводимости всех КЭ напряжения в узлах 2 и 3 равны и ток по ребру (2, 3) нулевой. Изменение нагрузок не влияет на этот ток. Ребро (1, 5) является псевдонулевым, зависящим от нагрузок. При определенном соотношении проводимостей нагрузок $g_{н1}$ и $g_{н2}$ ток в ребре (1, 5) может стать нулевым.

Выявить псевдонулевые ребра можно методом «перекоса» коммутационной структуры, при использовании которого требуется два раза выполнить расчет коммутационной структуры. Один расчет выполняется при одинаковых значениях всех проводимостей коммутационной структуры. Во втором расчете каждая проводимость g изменяется на некоторую величину $g_i = g + \Delta g_i$, где значение Δg_i зависит от номера i последовательности ребер.

Рассмотрено два варианта выбора значения Δg_i : 1) случайный из диапазона $0 - \Delta g_{\max}$; 2) в зависимости от номера i .

На рис. 5, а, напряжения в узлах равны, $u_2 = u_3$ и $u_1 = u_5$, токи в ребрах (2, 3) и (1, 5) — нулевые. В структуре, представленной на рис. 5, б, длины ребер соответствуют $g + \Delta g_i$, где значение Δg_i увеличивается в зависимости от i . Напряжения в узлах пропорциональны их расстоянию от линии уровня земли. Напряжения в узлах коммутационной структуры с перекосом $u_2 \neq u_3$ и $u_1 \neq u_5$, токи — ненулевые.

Результаты двух расчетов, полученные с использованием СЛАУ, позволяют решить проблему выявления псевдонулевых ребер. В качестве значений токов могут быть использованы результаты любого расчета.

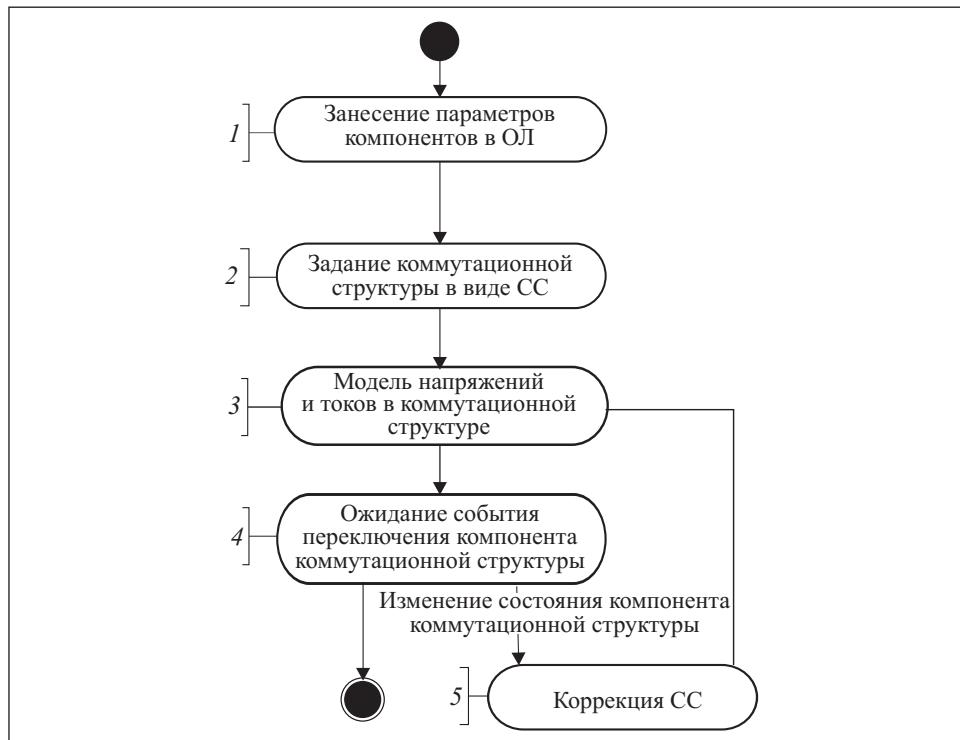


Рис. 6. Диаграмма состояний модели коммутационной структуры

Определение токов в коммутационной структуре с учетом силовых трансформаторов. Для включения трансформатора в эквивалентную схему коммутационной структуры ПС необходимо определить его эквивалентную проводимость по паспортным данным.

Исходные данные трансформатора. Мощность P (ВА), напряжение низкой U_n (В) и высокой U_v (В) сторон, относительные потери $\Delta P_{отн}$ (%).

Вычисляемые параметры. Максимальный ток со стороны низкого напряжения $I_{max_n} = P/U_n$; коэффициент трансформации $k_T = U_v/U_n$; абсолютное значение потерь $\Delta P = \Delta P_{отн} P$; эквивалентное падение напряжения на трансформаторе $\Delta U = \Delta P / I_{max_n}$.

Эквивалентная проводимость трансформатора $g_T = I_{max_n} / \Delta U$, или $g_T = P / \Delta P U_n^2$. Например, при $P = 40,5 \cdot 10^6$ ВА, $\Delta P_{отн} = 3\%$, $U_n = 6 \cdot 10^3$ В эквивалентная проводимость составит $g_T = 40$ Си.

Алгоритм определения наличия токов в компонентах коммутационной структуры представлен в виде UML (Unified Modeling Language) диаграммы состояний на рис. 6. Состояния 1 и 2 модели обеспечивают занесение параметров всех экземпляров компонент в объектный литерал (ОЛ)



Рис. 7. Диаграмма состояний расчета напряжений и токов в коммутационной структуре

(память параметров) и сохранение графа структуры в списке смежности (СС). После этого выполняется запуск модели (состояние 3), которая обеспечивает установку и вывод начальных состояний компонентов коммутационной структуры, а также расчет начальных напряжений в узлах и токов в ребрах. Затем модель переходит в режим ожидания управляющего события (состояние 4).

По событию переключения (от пользователя тренажера) КЭ переходит в новое состояние и параметры данного экземпляра компонента (состояние 5) передаются на базовую модель коммутационной структуры, где корректируются ОЛ и СС. Задачей базовой модели является пересчет напряжений в узлах и токов в ребрах коммутационной структуры ПС в новом ее состоянии.

Полная коммутационная структура задана в виде СС соответствующего ей графа. Каждому узлу u графа ставятся в соответствие узлы концов ребер v_i , началом которых является узел u .

Модель UML алгоритма расчета напряжений и токов в коммутационной структуре представлена на рис. 7, на котором рядом с состояниями модели указаны оценки времени их выполнения. Существенное влияние на время выполнения алгоритма при значительном числе узлов V коммутационной структуры оказывает время решения СЛАУ, пропорциональное числу узлов в третьей степени.

Выбор метода решения СЛАУ. Выбрать метод решения СЛАУ можно, сравнив производительность различных алгоритмов. Рассмотрим некоторые прямые методы решения. Матрицы A электрических цепей, эквивалентных различным состояниям коммутационной структуры, симметричны и являются разреженными. Оценки производительности решения СЛАУ следующие [3—5]:

1. Метод Гаусса: $0,8n^3 + 1,8n^2 + 4n$.
2. Метод Гаусса—Жордана: $1,15n^3 + 0,65n^2 + 2,4n$.
3. Метод Краута: $1,43n^3 + 2,8n^2 + 6,36n$.
4. Метод LU: $0,93n^3 + 3,8n^2 + 7,1n$.
5. Метод Холецкого для разреженных матриц: $0,4n^3 + 3n^2 + 2n$.

Следует заметить, что нет необходимости строить матрицу A и решать СЛАУ для всех узлов коммутационной структуры. Узлы, недоступные по напряжению из ИСТОКА, можно игнорировать. Поэтому на подготовительном этапе определяются узлы, доступные по напряжению, и только для них формируется матрица A .

Автоматическое формирование данных для решения СЛАУ. Тренажер оперативных переключений — это сцена (окно) с рисунком мнемосхемы ПС, на которой размещены КЭ — выключатели, разъединители, заземлители. Узлы соединений компонентов размечены на мнемосхеме ПС неповторяющимися числами. Каждый КЭ имеет параметры: состояние (включено-выключено) и ИНДЕКС (соответственно номерам соединяемых узлов). На основании этой информации может быть задана коммутационная структура ПС в виде СС и список параметров компонентов.

В СС для каждого узла u_i коммутационной структуры содержится список (одномерный массив) номеров узлов v_j , с которыми узел u_i соединен дугами (u_i, v_j) . Поскольку ребро представляет собой две встречно направленные дуги, в СС каждое ребро представлено двумя дугами: (u_i, v_j) и (v_j, u_i) .

Узел ИСТОК — это общий узел всех КЭ, к которым подведены вводы от ЭЭС. ИНДЕКС этих КЭ имеет вид 0_v_j . Внешние нагрузки от ПС представлены в коммутационной структуре дугами с индексами u_i_0 .

Список смежности создается по параметру ИНДЕКС для всех КЭ коммутационной структуры. Матрицу проводимостей A , симметричную относительно главной диагонали, строим согласно СС.

Для повышения эффективности модели коммутационной структуры желательно:

напряжения в узлах рассчитывать с помощью СЛАУ не для всех узлов, а только для доступных из ИСТОКА;

вместо модели с проводимостями нагрузки использовать модель с токами нагрузки, для которой матрица A не содержит проводимостей нагрузок, а только проводимости КЭ и эквивалентные проводимости трансформаторов;

вместо двух расчетов модели (с перекосом и без перекоса) с использованием СЛАУ выполнить один расчет по СЛАУ для значений токов, а для второго расчета использовать алгоритм топологического поиска токовых ребер.

Выводы

При создании мультимедийных тренажеров для персонала энергоузла и ПС необходимы модели коммутационных структур, формирующие напряжения в узлах и токи через КЭ коммутационных структур при комфортном времени отклика.

1. Использование цепи с токами нагрузок и базовым узлом в узле ИСТОК вместо эквивалентной цепи коммутационной структуры с проводимостями нагрузок и базовым узлом в месте их соединения позволяет увеличить диапазон расчетных напряжений на КЭ до максимальных значений, что обеспечивает уменьшение методической ошибки расчета токов в коммутационной структуре, определяемой разрядностью вычислений.

2. Автоматическое формирование данных для решения СЛАУ позволяет использовать общий алгоритм для различных структур и конфигураций сети, сокращая время и затраты на разработку тренажера.

3. Матричное представление коммутационной структуры определяется только узлами, доступными по напряжению из ИСТОКА. Для определения таких узлов применяется известный алгоритм топологического поиска.

4. При расчете эквивалентной цепи коммутационной структуры возможно появление псевдонулевых ребер двух типов. Метод перекоса позволяет определить эти ребра и внести их в состав токовых, однако для этого требуется два решения СЛАУ.

The model of commutative structure (KS) of electrical substation for training simulators of operational switches has been proposed, which allows determining voltage at the nodes and currents passing through the commutative elements. The currents in the equivalent electrical circuits and pseudo zero KS edges are determined using the system of linear algebraic equations.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Самойлов В.Д.* Определение напряжений и токов коммутационной структуры поиском на графе // Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАНУ. Спец. вип. «Моделювання та інформаційні технології: Матеріали конференції «Моделювання — 2010». Т.3. — Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАНУ, 2010. — С. 131—139.
2. *Набор программ малой электронной цифровой вычислительной машины «МИР».* Т.1. Методы вычислений. Кн. 1. — Киев : Наук. думка, 1970. — 236 с.
3. *Писсанецки С.* Технология разреженных матриц. — М. : Мир, 1988. — 410 с.
4. *Davis T. A.* Direct Methods for Sparse Linear Systems. — Philadelphia. : SIAM, 2006. — 226 p.
5. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К.* Алгоритмы: построение и анализ. 2-е изд. :Пер. с англ. — М. : Изд. дом «Вильямс», 2007. — 1296 с.

Поступила 12.11.12

САМОЙЛОВ Виктор Дмитриевич, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом имитационного моделирования Ин-та проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. В 1960г. окончил Украинскую академию сельскохозяйственных наук. Область научных исследований — компьютерные технологии моделирования, тренажеры, профессиональная диагностика в энергетике.

АБРАМОВИЧ Роман Петрович, руководитель сектора Акционерного общества «Львов ОРГРЭС». В 2007 г. окончил Национальный университет «Львівська політехніка». Область научных исследований — технология моделирования и построения тренажеров, подготовка персонала в энергетике.

