

# ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

АВТОР:

Ю. П. ГАЛИШНИКОВ  
ООО «ИПЦ «УЧЕБНАЯ  
ТЕХНИКА»

**А**нализ и моделирование электроэнергетических систем и устройств, их составляющих, является необходимым этапом разработки таких

систем. На смену аналоговому моделированию, широко используемому ранее, приходит цифровое моделирование, основанное на современных компьютерных технологиях.

**Ключевые слова:** метод собственных (фазовых) координат; сложные аварийные режимы турбогенераторов.



Рабочее место оператора симулятора RTDS для моделирования в реальном времени электроэнергетических систем (Исследовательский центр силовых систем RTDS Technologies, Канада)

## ВВЕДЕНИЕ

Цифровизация в энергетике приобретает реальные практические формы. С одной стороны, этому способствуют те изменения, которые есть в силовой части электроэнергетических систем (ЭС) в виде применения наряду с традиционными электрическими машинами, трансформаторами и линиями электропередачи крупных ветроэлектростанций и фотоэлектрических установок, внедрения управляемых силовых электронных устройств в сетях переменного и постоянного тока, что в совокупности существенно усложняет конфигурацию энергосистем. С другой стороны, ужесточаются требования к цепям управления, а именно к релейной защите и автоматизации (РЗА), а также к диспетчеризации, которые непосредственно «отвечают» за устойчивое функционирование энергосистем, что касается их быстродействия, надежности срабатывания/несрабатывания и др. Должна быть повышена скорость обнаружения и соответственно устранения аварийных режимов. Все это делает необходимой разработку новых систем, что, в свою очередь, требует создания аппаратных возможностей для их испытания в процессе разработки. Примером является выполняемый в настоящее время проект «Цифровая подстанция» при участии ЗАО «ЭнЛАБ» [7].

В прежнее время для испытаний устройств РЗА в процессе их создания использовались аналоговые модели электроэнергетических систем, работавшие в режиме реального времени, что позволяло подключать к ним любые устройства. На смену аналоговым моделям ЭС с их недостатками (высокие капитальные и эксплуатационные затраты, громоздкость, сложность воспроизведения параметров конкретных ЭС и т. д.) по мере развития компьютерных технологий пришло цифровое

моделирование. Так, канадской компанией RTDS Technologies, Inc., ставшей первопроходцем, был создан цифровой симулятор реального времени RTDS (Real Time Digital Simulator). В нем совместились точность и гибкость цифрового моделирования с возможностью подключения к реальным устройствам РЗА.

## ПРОБЛЕМЫ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В качестве математической основы RTDS использованы идеи Г. Доммеля, представленные в его публикации 1969 г. о цифровом компьютерном моделировании переходных электромагнитных процессов в одно- и многофазных сетях [11]. Здесь для анализа квазиустановившихся процессов в электрических сетях произвольной конфигурации с сосредоточенными или распределенными параметрами использована модификация известного метода узловых потенциалов, что предполагает математическое описание анализируемой электрической цепи системой алгебраических уравнений. При этом потери электрической мощности в сети учитываются косвенно. Источники энергии представляются упрощенно как электродвижущая сила (ЭДС), возникающая за сопротивлением, или как шины бесконечной мощности. Данный подход оправдан при рассмотрении электромагнитных волновых процессов в длинных линиях. Из статьи Х. Доммеля [11] следует, что именно явления в длинных линиях при подключении напряжения к входному концу линии называются электромагнитными переходными процессами (англ. transients). Приходится, однако, констатировать, что этот подход в силу принятых допущений не может

обеспечить требуемое качество моделирования таких аварийных режимов в реальных электроэнергетических системах, как короткие замыкания (КЗ), обрывы фаз, динамика синхронных генераторов при набросах/сбросах нагрузки и др. Например, электрические машины переменного тока (синхронные и асинхронные), различающиеся изменением параметров в переходных режимах, оказывают во многих случаях определяющее воздействие на сам характер таких режимов. Поэтому надлежащее представление этих машин при моделировании переходных электромагнитных процессов в ЭС имеет принципиальное значение. Их адекватное моделирование необходимо и при анализе проблем устойчивости энергосистем. Поэтому для дальнейшего продвижения нужно изыскивать новые возможности цифрового компьютерного моделирования переходных процессов в ЭС [7].

## ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ. МЕТОД СОБСТВЕННЫХ (ФАЗОВЫХ) КООРДИНАТ

Ниже кратко описан опыт компьютерного моделирования переходных электромагнитных и электромеханических процессов в ЭС, содержащих машины переменного тока, трансформаторы и линии электропередачи

(ЛЭП). Общий подход представлен в работе Ю.П. Галишникова [12], а конкретные результаты опубликованы в ряде ведущих отечественных периодических изданий [1–5, 8, 9].

Переходные процессы в силовых электрических цепях переменного тока, представляющие научный и практический интерес, таковы, что нередко приходится рассматривать совместную работу довольно большого числа устройств, которые существенно отличаются друг от друга по структуре или физической природе. Различно и их математическое описание. Так, вращающаяся

электрическая машина описывается дифференциальными уравнениями с периодически меняющимися коэффициентами. Трансформатор, пренебрегая магнитным насыщением, можно описать линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, что справедливо и для линий электропередачи. Таким образом, совместное их рассмотрение в общей электрической цепи требует и общих методов анализа электрических силовых цепей.

Весьма полезны в этом отношении идеи тензорного анализа, фак-

тически мало или почти не применявшиеся в прошлом при исследовании переходных процессов в цепях с электрическими машинами и трансформаторами.

В основу тензорного анализа электрических цепей положено следующее. Если матрицы некоторой цепи представляют собой тензоры, то матричное уравнение этой цепи, выраженное через их посредство, будет одинаково по структуре для группы цепей, физически аналогичной данной («второе обобщение» Крона). Отсюда вытекает приведенный ниже алгоритм.

1. Выбирается цепь, анализ которой наиболее прост (так называемая элементарная цепь), определяются матрицы этой цепи, составляется искомое уравнение (система уравнений) в матричной форме.
2. Устанавливается частная матрица преобразования, характеризующая связь между интересующей и элементарной цепями.
3. С помощью матриц элементарной цепи определяются матрицы интересующей цепи.
4. Уравнение интересующей цепи составляется с использованием ее матриц как копия уравнения элементарной цепи.

Ниже в качестве элементарной используется такая электрическая машина, которая имеет произвольное количество обмоток на статоре и роторе, причем обмотки, лежащие по одну сторону воздушного зазора, произвольно расположены относительно друг друга (рис. 1).

Цепь каждой из обмоток замкнута в общем случае на источник напряжения. Это пригодно для описания любых машин переменного тока. Математически элементарная маши-

## ТРЕХФАЗНАЯ СИНХРОННАЯ МАШИНА С ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ДЕМПФЕРОМ НА РОТОРЕ (а) И ЭЛЕМЕНТАРНАЯ МАШИНА (б)

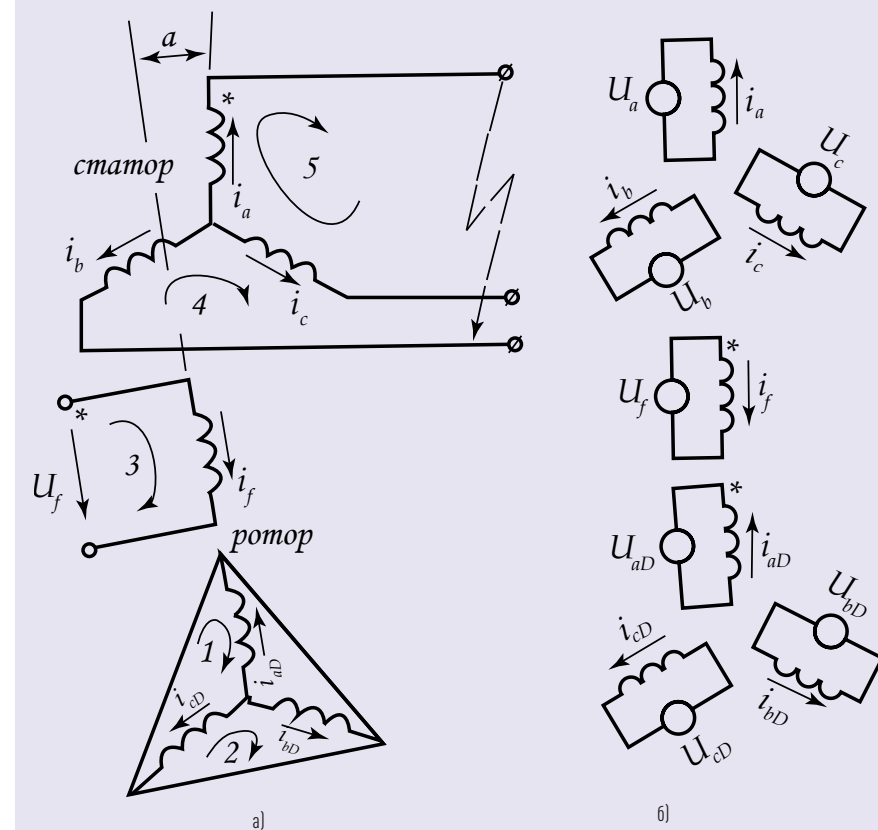


Рис. 1

на в каждом частном случае представляет собой описание анализируемой машины в ее собственных координатах.

Учитывая, что индуктивности обмоток вращающейся машины в общем случае есть функции времени, имеем:

$$[U_3] = -[L_3] \cdot p[i_3] - ([r_3] + p[L_3]) \cdot [i_3], \quad (1)$$

где  $[U_3]$  — столбцовая матрица приложенных напряжений обмоток элементарной машины;

$[i_3]$  — столбцовая матрица токов обмоток элементарной машины;

$[L_3]$  — квадратная матрица индуктивностей обмоток элементарной машины;

$[r_3] + p[L_3]$  — квадратная комплексная матрица элементарной машины;

$p$  — условное обозначение производной по времени.

Здесь индуктивности должны быть представлены в относительных единицах. Для этого использована система относительных единиц с базисным  $\frac{2}{m} x_{ad}$  [8].

При данном подходе обмотки машины могут быть воспроизведены аналитически с любой требуемой степенью подробности. Пусть далее необходимо получить матричное уравнение напряжений, описывающее машину при трехфазном КЗ на выводах ее статора. Согласно изложенному выше, для этого требуется прежде всего найти матрицу преобразования, которая в данном случае определяет соотношение между токами обмоток элементарной машины и токами независимых замкнутых контуров интересующей машины. Соответственно для токов получаем:

## ТРЕХФАЗНЫЙ ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР $Y/\Delta$ (а) И ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР (б)

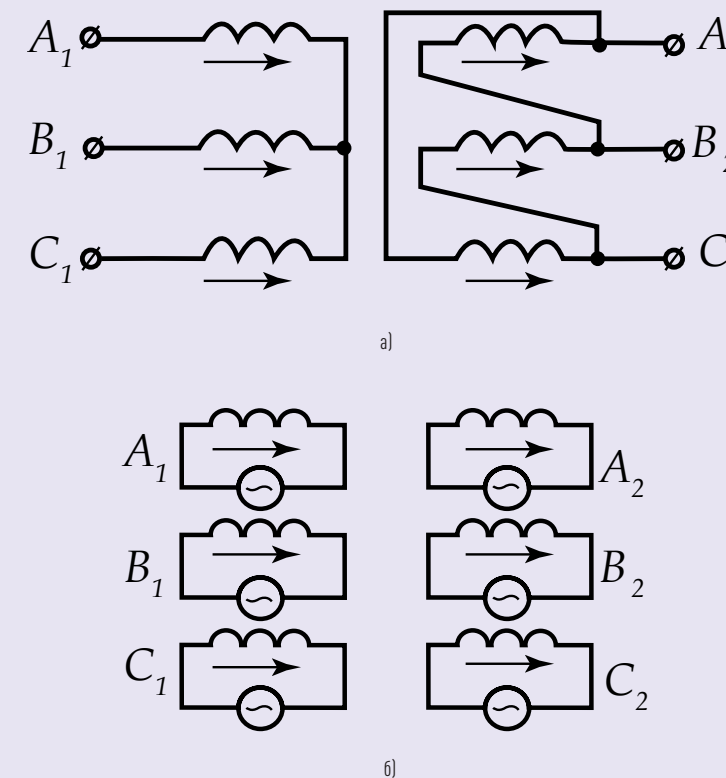


Рис. 2

$$[i_3] = [c] \cdot [i_k], \quad (2) \quad [U_k] = [L_k] \cdot p[i_k] - ([r_k] + p[L_k]) \cdot [i_k]. \quad (4)$$

где  $[i_k]$  — матрица контурных токов.

По условию инвариантности мощности получаем для матрицы контурных напряжений:

$$[U_k] = [c_t] \cdot [U_3], \quad (3) \quad [L_k] = [c_t] \cdot [L_3] \cdot [c]. \quad (5)$$

где  $[c_t]$  — транспонированная матрица преобразования.

После элементарных преобразований получаем для интересующей машины:

$$([r_k] + p[L_k]) = [c_t] \cdot ([r_3] + p[L_3]) \cdot [c]. \quad (6)$$



## ИНФОРМАЦИЯ

Цифровой симулятор реального времени (RTS в качестве аббревиатуры) рекомендован комитетом IEEE для симулятора в реальном времени, применимого для электроэнергетических системах. RTS реализует технологию моделирования энергосистем для быстрого, надежного, точного и экономичного анализа энергосистем со сложным переменным током высокого напряжения (HVAC) и сети постоянного тока высокого напряжения (HVDC). RTS — это полностью цифровой имитатор энергосистемы с электромагнитными переходными процессами, работающий в режиме реального времени. HYPERSIM — один из доступных коммерческих RTS, он был разработан Hydro-Québec, а eMEGAsim был разработан OPAL-RT Technologies Inc., которая родилась в Hydro-Québec. HYPERSIM теперь доступен от OPAL-RT Technologies. RTDS — торговая марка симулятора RTS, предоставляемого RTDS Technologies.

RTS позволяет решать следующие задачи:

- полный цикл проверки релейной защиты, единой защиты и схем управления;
- полный цикл проверки систем управления для HVDC, SVC, TCSC и синхронных машин;
- разработка устройств FACTS и связанных с ней средств управления;
- изучение работы систем переменного тока, включая режим генерации и передачи электрической энергии;
- исследование взаимодействия оборудования для энергетики;
- изучение взаимодействия между AC/DC системами.

Матрицы интересующей машины в любом ее режиме по выражениям (2), (3), (5) и (6) можно находить по известным параметрам элементарной машины как вручную, так и посредством ЭВМ. Последнее открывает широкие возможности для создания универсальных компьютерных моделей, так как математическое воспроизведение того или иного режима (в том числе аварийного) интересующей машины легко осуществляется введением в ЭВМ соответствующей матрицы преобразования  $[c]$  с последующим нахождением матриц  $[i_k]$ ,  $[U_k]$ ,  $[L_k]$  и  $[r_k] + p[L_k]$ . Аналогично могут быть сформированы уравнения любой электрической машины переменного тока, например асинхронного двигателя.

Любой трансформатор с описанных выше позиций также первоначально представляется в виде элементарной цепи. Например, двухобмоточному трехфазному трансформатору соответствует элементарный аналог (рис. 2), который, если пренебречь изменением индуктивностей обмоток из-за переменного магнитного насыщения сердечника, описывается в общем виде следующим матричным уравнением напряжений:

$$[U_3] = -[L_3] \cdot p[i_3] - [r_3] \cdot [i_3]. \quad (7)$$

Как правило, анализируемые силовые цепи содержат ряд устройств, определенным образом соединенных друг с другом. Например, кроме данной синхронной машины, часто бывает необходимо рассматривать также подключение к ее статору трансформатора и моделируемую каким-либо способом энергосистему, на шины которой включен трансформатор. Тогда при наличии в общем случае  $n$  отдельных устройств в анализируемой цепи матрица индуктивностей элементарной цепи должна быть представлена в виде

$$[L_3] = \begin{bmatrix} [L_3^{(1)}] & & & & & \\ & [L_3^{(2)}] & & & & \\ & & \cdot & & & \\ & & & \cdot & & \\ & & & & \cdot & \\ & & & & & [L_3^{(n)}] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $[L_3^{(1)}]$ ,  $[L_3^{(2)}]$  ...  $[L_3^{(n)}]$  — матрицы индуктивностей элементарных подцепей.

Комплексная матрица  $[r_3] + p[L_3]$  образуется аналогично.

Способ, которым отдельные устройства включены по отношению друг к другу в анализируемой цепи, описывается с помощью матрицы преобразования. Для ее нахождения должны быть определены и обозначены независимые контуры анализируемой цепи.

Соответствующие матрицы анализируемой цепи находятся с помощью соотношений (2), (3), (5) и (6). Матричное уравнение напряжений имеет вид (4).

Таким образом, формирование матричного уравнения напряжений анализируемой цепи независимо от числа входящих в нее отдельных устройств всегда производится единообразно, что существенно облегчает этот процесс при работе вручную, а также позволяет легко его компьютеризировать.

Однажды полученные исходные математические описания тех или иных устройств, представленных в виде соответствующих элементарных цепей, могут быть прямо использованы в последующих анализах различных схем, содержащих эти устройства. При данном подходе, который

## БАЗОВЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА НА ЭВМ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общий (базовый) алгоритм расчета на ЭВМ аварийных режимов различного вида в цепях произвольной конфигурации с синхронными машинами и трансформаторами можно предоставить в виде следующей очередности операций:

- 1) ввод параметров синхронных машин, включая, когда необходимо, обмоточные данные, а также параметров трансформаторов и энергосистемы;
- 2) определение значений введенных параметров в относительных единицах;
- 3) ввод матрицы преобразования, описывающей анализируемую цепь;
- 4) ввод начальных условий, включая предварительную нагрузку, и вычисление начальных значений токов в ветвях и напряжений в узлах цепи;
- 5) формирование контурных матриц токов и напряжений;
- 6) формирование элементов матрицы  $[r_k]$  и не зависящих от времени элементов матрицы  $[L_k]$ ;
- 7) формирование переменных элементов матриц  $[L_k]$  и  $p[L_k]$ ;
- 8) вычисление значений контурных токов на данном шаге методом Рунге — Кутты четвертого порядка (начиная с четвертого шага можно использовать какую-либо из модификаций метода прогноза и коррекции);

назван методом собственных (фазовых) координат, проще учитывать возможные изменения структуры анализируемой цепи, например, при переходе от одной ступени КЗ к другой или каких-либо переключениях вследствие действия РЗА. Рассмотрены цепи с сосредоточенными параметрами. Однако описанный подход применим также и для цепей с распределенными параметрами при использовании их схем замещения.

Матричный анализ, облегчая формирование уравнений анализируемой цепи, не предлагает каких-либо способов решения получаемых уравнений. Но если в анализируемую цепь входят одна или несколько электрических машин, моделируемых описанным выше способом, матричное дифференциальное уравнение (4) с периодически меняющимися коэффициентами может иметь только численное решение, для чего пригодны, например, методы Рунге — Кутты и/или известные модификации метода прогноза и коррекции. С целью численного решения на ЭВМ уравнение (4) должно быть разрешено относительно производных токов:

$$p[i_k] = [L_k]^{-1} \cdot \{U_k + ([r_k] + p[L_k]) \cdot [i_k]\}. \quad (9)$$

Как видно, для вычисления производных токов требуется обращение матрицы индуктивностей  $[L_k]$ . Если, как в случае вращающейся электрической машины, хотя бы некоторые элементы являются функциями времени, необходимо получать обратную матрицу индуктивностей на каждом расчетном шаге (один или несколько раз в зависимости от выбранного численного метода), и главным образом это определяет затраты времени ЭВМ. Тогда полезно решать уравнение (4) путем разделения матриц.

## ИНФОРМАЦИЯ

Из «Стандарта организации ПАО «ФСК ЕЭС». «Типовые технические требования к функциональной структуре автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций Единой национальной электрической сети (АСУ ТП ПС ЕНЭС)»

5.3. Задачи регистрации параметров переходных процессов в аварийных режимах

АСУ ТП ПС должна обеспечивать выполнение следующих задач регистрации параметров переходных процессов в аварийных режимах:

- Сбор зарегистрированных данных от устройств, имеющих встроенную функцию регистрации аварийных процессов и событий.
- Упорядоченное ведение архивов для обеспечения качественного ретроспективного анализа переходных процессов и возмущений в сети.
- Формирование и помещение в долговременные архивы характеристик процессов, влияющих на эксплуатационную надежность оборудования.
- Фиксация и отображение результатов работы алгоритма ОМП автономных устройств ОМП, РЗА, РАС.
- Мониторинг работы первичного оборудования, в том числе автотрансформаторов (трансформаторов) и устройств РПН, синхронных компенсаторов и др.
- Контроль состояния элегазового оборудования.
- Контроль состояния ОПН, разрядников.
- Контроль срабатывания устройств КИВ.
- Контроль состояния ЩПТ, АБ, ЩСН.

- 9) вычисление токов в ветвях, напряжений в узлах расчетной схемы и электромагнитного момента синхронной машины на данном шаге;
- 10) уточнение значений элементов матриц и с учетом насыщения зубцов токами аварийного режима;
- 11) вывод результатов на печать;
- 12) занесение в оперативную память ЭВМ значений интересующих токов;
- 13) переход к п. 7 для расчета следующего шага;
- 14) расчет требуемого числа шагов;
- 15) сохранение результатов расчета в отдельном файле (например, в формате Comtrade) для последующего их использования;
- 16) останов.

Подход к математическому моделированию переходных процессов в цепях с машинами переменного тока и трансформаторами, основные элементы которого рассмотрены выше, позволяет в принципе учитывать такие факторы, которые при традиционном аналитическом подходе учесть трудно или невозможно. Тем не менее, чтобы избежать чрезмерного усложнения модели без ощутимого повышения точности результатов, целесообразно при изучении электромагнитных переходных процессов принимать следующие допущения.

1. Частота вращения ротора синхронной машины при электромагнитных переходных процессах постоянна.
2. Магнитное насыщение синхронных машин и трансформаторов от главного поля при переходных процессах неизменно.

## БЛОК-СХЕМА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ ОТ КЗ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

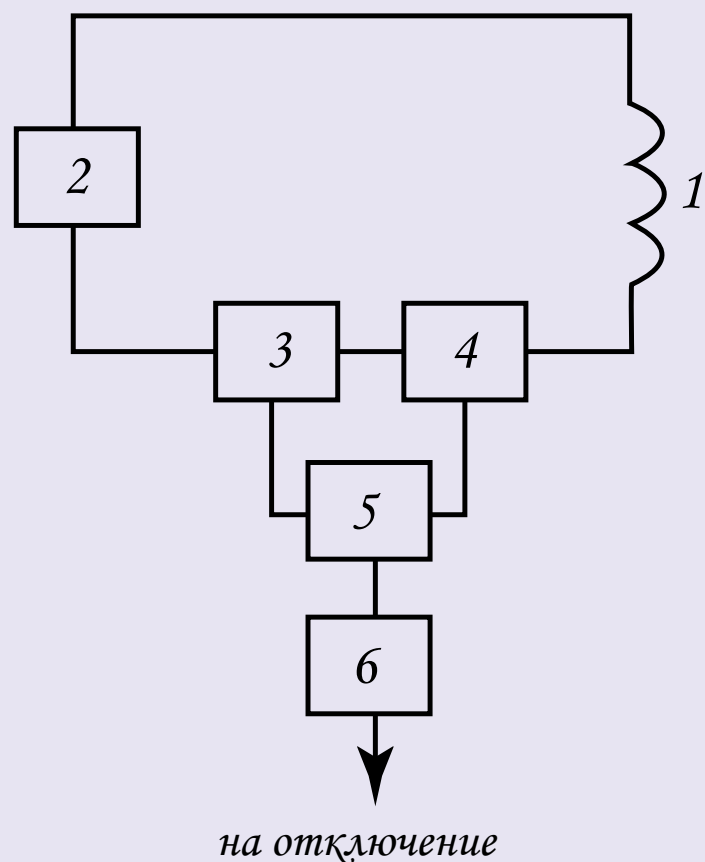


Рис. 3

3. Пространственное распределение магнитных полей, создаваемых в зазоре целыми обмотками синхронной машины, весьма близко к синусоидальному, и потому при описании индуктивностей обмоток статора и ротора от этих полей принимаются во внимание только первые гармоники. Высшие гармоники поля реакции якоря общепринято учитывать совокупно как поле дифференциального рассеяния. В турбогенераторах оно

пренебрежимо мало. В случае внутренних КЗ приходится считаться с тем, что каждая секция обмотки статора создает в зазоре поле с прямоугольным пространственным распределением, которое может быть разложено в ряд гармоник. Тогда секция характеризуется соответствующим рядом индуктивностей.

4. Демпфирующее действие массивного ротора синхронной неявнополюсной машины

воспроизводится с помощью эквивалентной короткозамкнутой обмотки.

5. Эффект явнополюсности ротора пренебрежимо мал. Это допущение справедливо для машин с цилиндрическим ротором. В случае необходимости магнитная несимметрия ротора при моделировании данным методом может быть свободно учтена.
6. Регулирование возбуждения отсутствует.
7. Фазные обмотки синхронных машин (за исключением случаев внутренних КЗ) и трансформаторов симметричны.
8. Энергосистема моделируется упрощенно, как ЭДС неизменной амплитуды с комплексным сопротивлением, зависящим от мощности системы. Результаты численного анализа ряда КЗ, сопоставленные частично с экспериментальными данными, подтверждают обоснованность принятых допущений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представленный выше алгоритм получил конкретную реализацию в виде ряда компьютерных программ и, таким образом, доказал свою высокую эффективность.

Так, было выполнено уникальное по глубине исследование на ЭВМ внезапных (неустановившихся) внутренних КЗ в обмотках статора турбогенераторов [8]. Виды внутренних КЗ весьма разнообразны, что во многом обусловлено схемами и конструкцией статорных обмоток. Чаще всего по понятным причинам встречаются

несимметричные замыкания, но наиболее интересны для практики однофазные КЗ, относительная частота возникновения которых составляет около 75%. Анализ затруднителен, потому что несимметричные внутренние КЗ произвольно меняют схему обмотки статора, но описанный выше подход позволил успешно преодолеть эти трудности и получить много практически полезной информации.

В ходе анализа установлено, что во всех рассмотренных случаях несимметричных внутренних КЗ соотношение между второй и первой гармониками тока возбуждения

$I_{f2m}/I_{f1m}$  находится в узком диапазоне значений 0,52–0,58. Данная особенность использована для совершенствования защиты от внутренних КЗ синхронных турбогенераторов [1], а именно для повышения ее чувствительности и, таким образом, устойчивости функционирования (рис. 3).

Поставленная цель достигается введением в цепь обмотки возбуждения (1), питаемой от системы возбуждения (2), блоков выделения модулей второй (3) и первой (4) гармоники тока возбуждения. Входные цепи названных блоков подключе-

## БЛОК-СХЕМА УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫМ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕМ

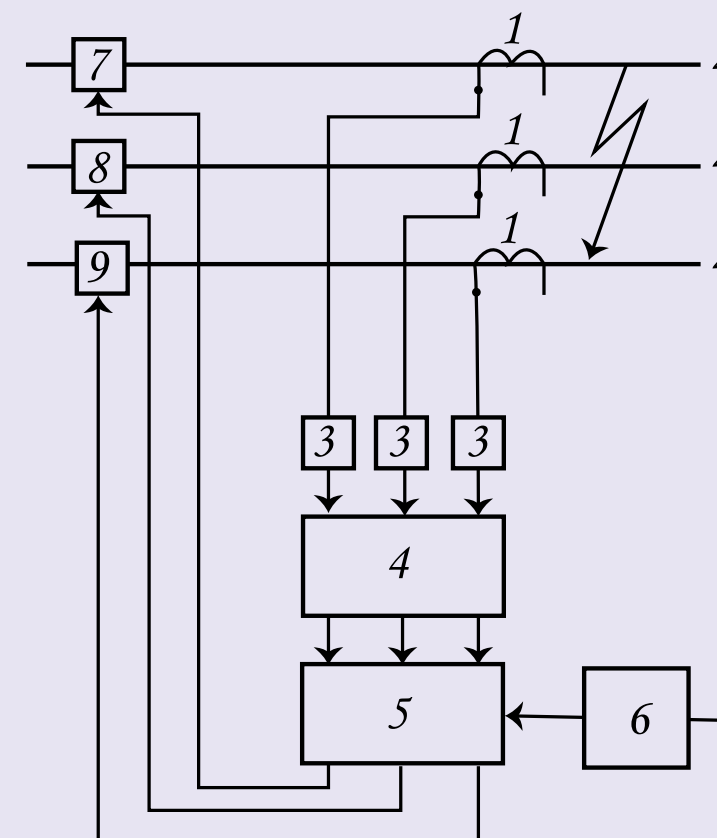


Рис. 4



ны к блоку определения отношения этих модулей (5), который также используется для настройки нуля схемы защиты при нормальной работе генератора. Входная цепь блока (5) подключена к пороговому блоку (6), где сравнивается с заданной величиной полученное в блоке (5) отношение модулей гармоник тока возбуждения. При возникновении внутреннего несимметричного КЗ величина отношения второй гармоники к первой резко возрастает, и на выходе блока (5) появляется сигнал, превышающий заданную (пороговую) величину. В результате срабатывает пороговый блок (6) и появляется сигнал на выходе схемы защиты. Реализация описанного выше устройства позволит существенно повысить устойчивость функционирования защиты турбогенератора от внутренних коротких замыканий, включая витковые.

Детально исследованы ранее слабо изученные неодновременные (последовательные) КЗ на выводах трехфазных синхронных турбогенераторов или, что равноценно, в комплектных шинпроводах энергоблоков. При наличии отвода на шины собственных нужд вероятность таких замыканий резко возрастает. Детально изучено явление задержки прохождения через нуль в одной или двух фазах вследствие появления повышенных апериодических составляющих токов КЗ из-за неодновременности КЗ различного вида [4].

Изучены также неодновременные КЗ на выводах высокого напряжения блока турбогенератор — трансформатор, ударные токи которых не очень опасны для турбогенераторов, но относительно более часты и разнообразны при заземленной нейтрали [3]. По результатам анализов разработаны способ и устройство (рис. 4) управляемого отключения цепей с токами, имеющими задержку прохождения через нуль [2, 9].

При возникновении трехфазного КЗ в цепи (2) блок (4) сравнения величин  $i_a$  определяет фазы с наименьшей и наибольшей величинами  $i_a$  и передает в блок задержки (5) команды, задерживающие импульс от релейной защиты (6) на заданное время. В результате первой разрывается фаза, ток которой имеет среднюю по величине апериодическую составляющую. Одновременно апериодические токи оставшихся фаз, усредняясь, приобретают величину, при которой обеспечивается успешное гашение дуг отключения. Тем самым уменьшается износ дугогасительных контактов выключателя.

С использованием описанного подхода была создана цифровая компьютерная модель асинхронизированного синхронного турбогенератора АСТГ-800, проектирование которого осуществлялось на основе теории, разработанной ВНИИЭ (М. М. Ботвинник, Ю. Г. Шакарян и др.), в НИИ харьковского завода «Электротяжмаш» для планировавшегося в начале 1990-х гг. использования данного турбогенератора на Нижневартовской ГРЭС. Модель предназначалась для компьютерного анализа электромагнитных и электро-механических переходных процессов при КЗ, сбросах и набросах нагрузки, а также при управлении возбуждением турбогенератора с целью изучения влияния АСТГ-800 на устойчивость энергосистемы, в частности, в режиме управляемого скольжения турбогенератора. В настоящее время интерес к данной тематике возродился в связи с развиваемой концепцией активно-адаптивной сети, о чем свидетельствуют публикации «НТЦ Россети ФСК ЕЭС» [6, 10]. Представляется, что кратко охарактеризованная выше цифровая модель асинхронизированного турбогенератора может быть использована в разработках систем управления возбуждением.

Анализ крутильных колебаний валопровода турбоагрегата, рабо-

тающего на ЛЭП постоянного тока в составе Павлодар-Экибастузского энергокомплекса, также осуществлен с использованием описанного выше базового алгоритма, дополненного математическими моделями полупроводниковых преобразователей и уравнением движения валопровода. Исследованы условия возникновения крутильных колебаний в резонансных и околорезонансных режимах. Изучено влияние различных факторов на величины крутильных колебаний, произведен расчет усталостной прочности валопровода, предложено устройство для подавления колебаний.

Помимо этого, в рамках научно-технического сотрудничества с ВЭИ была создана компьютерная модель асинхронно-вентильного каскада (АСК). В состав силовой цепи АСК входит асинхронный электродвигатель (АД) с фазным ротором, обмотка статора которого подключена к питающей трехфазной сети. Обмотка фазного ротора АД подключена к выпрямителю на неуправляемых диодах. Для снижения пульсаций в звене постоянного тока предусмотрены сглаживающие реакторы. Эта цепь далее через инвертор на управляемых тиристорах и трехфазный двухобмоточный трансформатор с соединением обмоток звезда-треугольник замыкается на питающую сеть. Таким образом обеспечивается рекуперация мощности скольжения в питающую сеть. Также используются выпрямитель и инвертор шестипульсной схемы моста Ларионова. В модели надлежащим образом представлены блоки системы управления и регулирования вентилей. Вентильные преобразователи сложны для моделирования. Трудность воспроизведения их работы связана в том числе и с тем, что имеется большое число комбинаций состояний вентилей при различных режимах работы. Поэтому была предложена оригинальная модель процесса включения/отключения запираемого

вентиля в виде последовательно-параллельных цепочек R, L и C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научное и практическое значение метода собственных (фазовых) координат состоит в том, что он является универсальным, так как обеспечивает единообразие математического описания расчетных цепей, содержащих электрические машины, трансформаторы, ЛЭП и электронные устройства, весьма различной конфигурации и при любом виде их несимметричности.

Возможен адекватный учет изменения параметров вследствие магнитного насыщения и других нелинейных эффектов путем использования итеративной расчетной процедуры. Последнее снимает какие-либо принципиальные ограничения точности результатов. Нет также ограничений в отношении объема исследуемых цепей. Ясно, что данное моделирование даже при современном уровне развития ЭВМ может осуществляться, скорее всего, лишь в так называемом автономном (независимом) формате по той причине, что время вычисления каждого расчетного шага (интервала) больше времени реального процесса.

В этом заключается отличие данного подхода от цифрового моделирования замкнутого цикла в реальном времени (CSRTDS). В нашем случае расчетные результаты, как отмечалось, сохраняются в соответствующих файлах (например, в формате Comtrade), а позднее могут отображаться для гармонического или иного анализа. Они могут также воспроизводиться на некоем испытательном оборудовании или после цифроаналогового преобразования вводиться непосредственно в тестируемые устройства РЗА или какие-либо другие.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Галишников Ю.П., Кирейцев В.В. Устройство для защиты синхронного генератора от внутренних замыканий обмотки статора. Авторское свидетельство СССР № 688950. Бюллетень № 36. 1979.
2. Галишников Ю.П., Моисеев В.С., Клочков А.А. Управляемое отключение цепей с токами, имеющими задержку прохождения через нуль//Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1979. С. 47–49.
3. Галишников Ю.П., Моисеев В.С. Последовательные короткие замыкания на стороне ВН блока «турбогенератор — трансформатор» и проблема их отключения//Электричество. 1978. № 5. С. 72–75.
4. Галишников Ю.П., Моисеев В.С. Токи последовательных коротких замыканий в турбогенераторах//Электричество. 1977. № 6. С. 64–67.
5. Галишников Ю.П. О предпочтительной системе относительных единиц для анализа синхронных машин в фазовых координатах//Изв. вузов. Электромеханика. 1979. № 2. С. 1054–1057.
6. Довганюк И.Я. и др. Концепция построения системы управления возбуждением асинхронизированных турбогенераторов//Электротехника. 2010. № 2. С. 30–35.
7. Законьшек Я. Моделирование энергосистем в реальном времени //Энергия единой сети. 2018. № 4. С. 62–70.
8. Кирейцев В.В., Галишников Ю.П. Однофазные короткие замыкания в обмотке статора турбогенератора с двумя параллельными ветвями на фазу//Электротехника. 1979. № 5. С. 43–47.
9. Способ управления трехфазным выключателем/Ю.П. Галишников, В.С. Моисеев, Н.И. Билик, Г.А. Славин. Авторское свидетельство СССР № 628545. Бюллетень № 38. 1978.
10. Шакарян Ю.Г. и др. Разработка и перспективы применения новых типов турбогенераторов с векторной системой управления возбуждением//Электротехника. 2010. № 2. С. 4 а–9.
11. Dommel H. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks.//IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-88. April 1969. No. 4. P. 388–399.
12. Galishnikov Y.P. Complex Short-Circuits in Power Networks Including Synchronous Machines and Transformers.//Publications of 3-rd International Conf. on Automatic Control and Protections of Electric Power Systems, Poland, 1979. Vol. 1. P. 273–277.



## МИКРООММЕТР ИКС-30А

- Диапазон измерений: 1 мкОм...100 кОм
- Max измерительный ток: 30 А
- Базовая погрешность измерений: 0,1%
- Аккумуляторное питание
- Интерфейс связи: Bluetooth



Измерение сопротивления обмоток трансформаторов мощностью до 100 МВА



Измерение переходных сопротивлений высоковольтных выключателей



Измерение сопротивления обмоток двигателей, генераторов и прочих вращающихся машин

