



С.3-1. Использование комбинированных методов моделирования процессов в больших электроэнергетических системах в масштабе реального времени и с опережением

Г.С. НУДЕЛЬМАН, А.А. НАВОЛОЧНЫЙ, О.А. ОНИСОВА
ОАО «ВНИИР»
Россия
aanav@vniir.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Моделирование в режиме реального времени, RTDS, eMEGAsim, HYPERSIM, электромагнитные переходные процессы, ЭМТ, векторные измерения, ePHASORsim, комбинированные методы моделирования.

1 ВВЕДЕНИЕ

Современные инструменты моделирования позволяют создавать модели объектов, максимально приближенные к реальным, обеспечивают возможность моделирования алгоритмов существующих и разрабатываемых устройств РЗА, а также интеграции в виртуальную модель реального времени физических устройств РЗА с выдачей на них сигналов тока и напряжения в аналоговом или цифровом виде, приемом дискретных сигналов отключения, ускорения, блокировки, реализацией воздействия этих сигналов на виртуальную модель. Однако следует принимать во внимание, что объем схемы, моделируемой в режиме реального времени с требуемой степенью детализации всегда ограничен. В связи с этим представляет существенный практический интерес разработка комбинированных методов моделирования: исследуемый фрагмент энергосистемы моделируется с максимальной степенью детализации, а прилегающая сеть – с рядом упрощений. Такой подход позволяет получить достаточно гибкую модель, адаптируемую под конкретные задачи исследования, избежав при этом необходимости упрощения схемы исследуемого объекта и значительного эквивалентирования прилегающей сети.

2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Для детального исследования поведения реальных устройств релейной защиты, автоматики и управления в условиях, максимально приближенных к существующим условиям их эксплуатации, широкое распространение получили моделирующие комплексы реального времени.

Выполнение современными цифровыми моделирующими системами расчетов электромагнитных переходных процессов в режиме реального времени обеспечивается сочетанием использования высокопроизводительных многопроцессорных структур и специально разработанных вычислительных методов, наибольшую известность среди которых приобрели ЭМТР-алгоритмы (ElectroMagnetic Transients Program), описанные в работах

профессора Г. Доммеля (Herman W. Dommel), а также методы переменных состояния (пространства состояний – Space-State).

В соответствии с подходом, реализованным в EMTP-алгоритмах [1], исходные дифференциальные уравнения, описывающие статические элементы электрической сети с сосредоточенными параметрами, преобразуются и решаются в форме разностных:

$$[G(\Delta t)] \cdot U(t) = I(t) - I(t - \Delta t), \quad (1)$$

где $[G(\Delta t)]$ – матрица узловых проводимостей; $U(t)$ – вектор напряжений в узлах электрической сети в момент времени t ; $I(t)$ – вектор токов источников тока в момент времени t ; $I(t - \Delta t)$ – вектор токов источников тока в момент времени $(t - \Delta t)$. Укрупнённый алгоритм процесса расчёта, соответствующий рассматриваемому методу, представлен на рис. 1, а.

Так как матрица узловых проводимостей в уравнении (1) является функцией шага интегрирования Δt , он принимается постоянным. Величина шага обычно задаётся в интервале от 20 до 80 мкс. Это позволяет учитывать с достаточной степенью детализации переходные процессы с частотой до 2-5 кГц [2].

На использовании EMTP-алгоритмов основана работа моделирующих комплексов реального времени RTDS (производитель – компания RTDS Technologies Inc., Канада) и HYPERSIM (OPAL-RT Technologies Inc. – также канадский производитель).

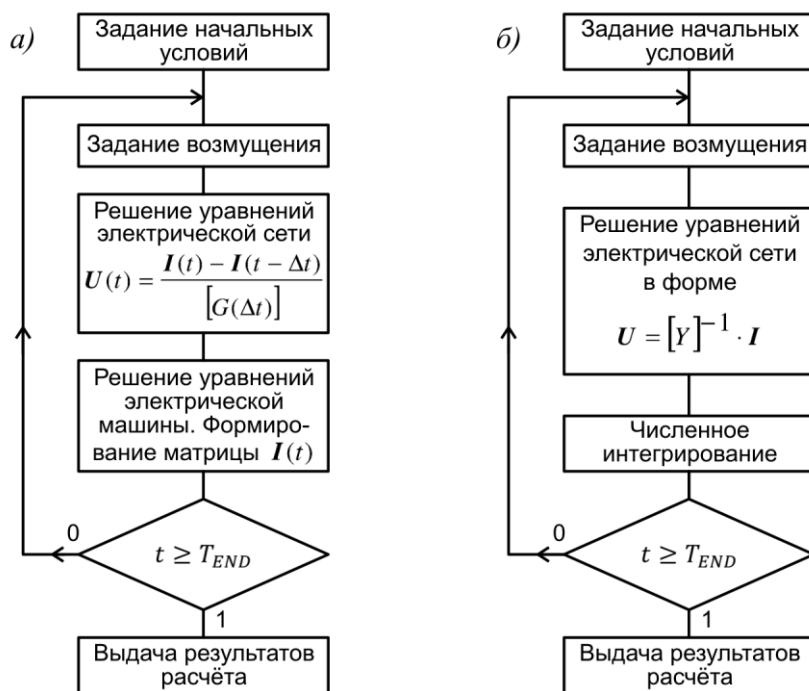


Рис. 1

Альтернативная разработка компании OPAL-RT – моделирующий комплекс eMEGAsim – использует при создании цифровой динамической модели реального времени возможности и ресурсы системы численных расчётов MatLab и среды визуального программирования Simulink, дополненные специально разработанными библиотеками моделей элементов и вычислительными подпрограммами (Solvers). В качестве алгоритмической базы при осуществлении вычислений используется модификация метода переменных состояния – State-Space Nodal (SSN [3, 4]), позволяющая оптимизировать (по сравнению с оригинальным методом) процесс распараллеливания вычислений между несколькими процессорами или их вычислительными ядрами [2].

Метод пространства состояний использует описание исследуемой системы n -ного порядка в виде одного дифференциального уравнения того же порядка либо в виде системы из n дифференциальных уравнений первого порядка [5, 4]:

$$\begin{aligned} X'(t) &= [A(t)] \cdot X(t) + [B(t)] \cdot V(t) \\ W(t) &= [C(t)] \cdot X(t) + [D(t)] \cdot V(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $X(t)$ – вектор переменных состояния (обычно – токов в индуктивностях и напряжений на ёмкостях); $V(t)$ – вектор источников внешних воздействий (э.д.с. и токов источников); $W(t)$ – вектор выходных (искомых) величин; $[A(t)]$ – основная матрица системы (матрица параметров); $[B(t)]$ – матрица связи между источниками (входом системы) и переменными состояниями; $[C(t)]$ – матрица связи переменных состояния с искомыми величинами (выходом); $[D(t)]$ – матрица связи входа и выхода системы.

Вне зависимости от используемых алгоритмов основными областями применения моделирующих комплексов реального времени данной группы являются:

- испытания устройств релейной защиты, режимной и противоаварийной автоматики, системных регуляторов, устройств FACTS и HVDC и т.п. в так называемом «замкнутом цикле», т.е. с учётом влияния испытываемого устройства на режим модели энергосистемы;
- разработка алгоритмов действия устройств защиты, регулирования и управления, систем управления устройствами FACTS;
- обучение и тренировка инженерно-технического персонала объектов электроэнергетики.

Принципиальный (и очевидный) недостаток инструментальных средств, выполняющих расчёты электромагнитных переходных процессов в режиме реального времени, заключается в присущем им ограничении на размеры моделируемой системы. Типичное (реально достижимое) количество однофазных узлов схемы составляет от 144 до 1000. Увеличить допустимый объём моделируемой схемы можно либо увеличивая шаг моделирования (но при этом ухудшается детализация моделируемых процессов), либо наращивая аппаратную часть комплекса: как правило, возможность расширения предусмотрена производителем, хотя и может быть связана со значительными материальными затратами.

В качестве альтернативной возможности может рассматриваться режим, при котором расчёты выполняются не в масштабе реального времени. Режим «медленного» расчёта может быть полезен в случаях, когда становится острой необходимостью детального моделирования значительной (большей, чем позволяет конфигурация имеющегося комплекса) по объёму схемы и при этом в работе модели не требуется учитывать реакцию испытываемого оборудования (достаточно лишь фиксировать «отклик» устройства «в привязке» к выдаваемым на него сигналам). Возможность реализуется за счёт записи в файл (например, в формате COMTRADE) формируемых с применением динамической модели выходных величин и их последующей выдачей на испытываемое устройство с использованием этого же комплекса, но уже в режиме реального времени и с регистрацией поведения устройства.

Режим расчёта с опережением, напротив, ещё более требователен к вычислительным ресурсам применяемого комплекса, однако может оказаться полезен в ситуации, когда необходимо успеть предупредить возможную локальную аварию в энергосистеме, получая от неё в режиме реального времени информацию о режимных параметрах и просчитывая процессы (с той достаточно высокой степенью детализации, которую алгоритмически обеспечивает моделирующий комплекс) в интересующем сравнительно небольшом её фрагменте быстрее, чем эти процессы развиваются на самом деле.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Сделать менее жёсткими ограничения (прежде всего, на объём моделируемой системы при расчётах в режиме реального времени), присущие рассмотренным выше инструментам, возможно за счёт введения следующих допущений. Поскольку при исследовании больших энергосистем на первое место выходят вопросы динамической устойчивости,

электромагнитные переходные процессы могут быть исключены из рассмотрения; при этом становится возможным от дифференциальных уравнений, описывающих электрическую сеть, перейти к алгебраическим [2, 6]:

$$X'(t) = f(X, U) \quad (3)$$

$$[Y] \cdot U = I(X, U) \quad (4)$$

$$X(t_0) = X_0 \quad (5)$$

Здесь $[Y]$ – матрица полных узловых проводимостей; выражение (4) задаёт описание электрической сети, (5) – определяет начальные условия, (3) – описывает поведение системы «в динамике» (определяется преимущественно свойствами вращающихся машин и устройств управления [6]). Укрупнённый алгоритм вычислений представлен на рис. 1, б.

При выполнении расчётов динамической устойчивости (Transient Stability – TS) оперируют т.н. «векторными» (Phasor) характеристиками электрических величин (длинами векторов и их относительными – т.е. рассчитываемыми или измеряемыми синхронно – углами). Поскольку векторное представление применимо лишь к сигналам определённой частоты (в данном случае – 50 Гц), шаг расчёта может быть существенно большим, чем при моделировании электромагнитных переходных процессов (до 10 мс – половина периода промышленной частоты [2]). Столь существенное увеличение шага и применяемый математический аппарат позволяют заявлять о предельном количестве однофазных узлов 100 000 при моделировании в режиме реального времени; типичное (реализуемое на данный момент времени) значение находится в интервале от 10 000 до 20 000 узлов.

Расчёт в «векторном» виде реализован, к примеру, в моделирующем комплексе ePHASORsim (компания OPAL-RT), выполненном на основе той же аппаратной платформы, что и комплекс eMEGAsim. Ввиду схожести математической базы сравнительно просто может быть обеспечено взаимодействие моделирующих комплексов рассматриваемой группы с модулями PMU (Phasor Measurement Unit), входящими в систему синхронизированных векторных измерений (СМПИ), а также с самой этой системой.

При организации расчётов «с опережением» на основе данных, получаемых от моделирующего комплекса, может быть своевременно сформирован прогноз поведения крупной электроэнергетической системы при возникновении в ней тех или иных возмущений. Таким образом, моделирующий комплекс может использоваться при реализации мероприятий по управлению энергосистемами, при разработке комплексных решений в сфере активно-адаптивных сетей (глобальных систем контроля, управления и защиты – WAMPAC), при создании тренажёров-советчиков диспетчера.

Главный недостаток средств моделирования данной группы определяется применяемым математическим аппаратом: сравнительно низкая степень детализации результатов моделирования.

4 КОМБИНИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Получить высокую степень детализации исследуемых процессов, учитывая при этом поведение объектов не только в изучаемом фрагменте электроэнергетической системы, но и в прилегающей сети (в ответственных случаях – во всей энергосистеме) можно, применяя комбинированные методы расчёта. Моделирование прилегающей сети в этом случае осуществляется укрупнённо (на основе «векторных» вычислений), а интересующего фрагмента – детально (с использованием EMTP- или SSN-алгоритмов). При таком подходе возникает необходимость обмена результатами моделирования между двумя образовавшимися вычислительными подсистемами на каждом шаге TS-расчёта (рис. 2).

Несмотря на то, что возможность реализации таких вычислений на одном моделирующем комплексе (eMEGAsim) экспериментально опробована и доказана [2], наиболее функциональным (в том числе, имеющим меньшие ограничения в части объёмов подсистемы, моделируемой укрупнённо) решением на данный момент времени является использование двух моделирующих комплексов, работающих согласованно и обменивающихся между собой информацией в процессе моделирования (рис. 3). Обмен данными может осуществляться с использованием протоколов, описываемых стандартами IEEE C37.118 и МЭК 61850; во многих

случаях допустимым также будет являться применение имеющихся (как правило) плат аналогового и дискретного ввода/вывода.

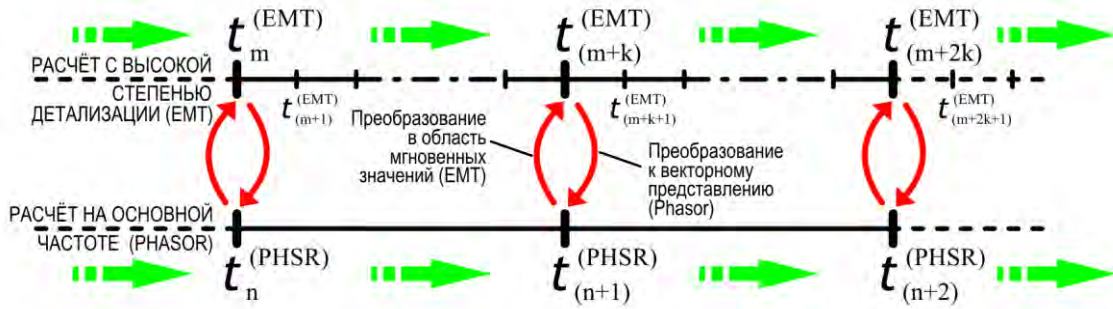


Рис. 2

При осуществлении моделирования с использованием двух моделирующих комплексов на том из них, который реализует вычисления в векторном виде, целесообразным может оказаться создание модели всей энергосистемы, а не только лишь сети, прилегающей к детально исследуемому фрагменту; на одном из этапов моделирования, когда режимы обеих моделей согласованы, выполняется «переключение» информационных сигналов с «внутреннего» фрагмента модели на «внешний» – реализуемый другим вычислительным комплексом. Такой подход – если требуется осуществлять несколько экспериментов, в каждом из которых исследовать электромагнитные переходные процессы необходимо в разных фрагментах одной и той же крупной энергосистемы – позволяет сократить временные затраты за счёт минимального вмешательства в укрупнённую модель при переходе от одного эксперимента к другому.



Рис. 3

Разновидность подхода, связанного с использованием двух согласованно работающих моделирующих комплексов, может быть применена в условиях внедрения на предприятии функционально полного цикла разработки устройств релейной защиты, автоматики, управления. При этом могут применяться комплексы, позволяющие моделировать процессы с одинаковой или схожей степенью детализации. С использованием одного комплекса осуществляется моделирование процессов в тестовой модели энергосистемы; параметры этих процессов (в виде цифровых и/или аналоговых и дискретных сигналов, соответствующих токам, напряжениям «виртуальной» модели, а также состояниям коммутирующей аппаратуры в ней) выдаются на другой комплекс, в котором реализуется детальный алгоритм функционирования разрабатываемого устройства. Обратно принимаются вырабатываемые управляющие воздействия, а также дополнительные сигналы, информирующие о работе

разрабатываемого алгоритма. Таким образом, второй моделирующий комплекс на данном этапе разработки выступает в роли прототипа (опытного образца) будущего устройства (рис. 4).

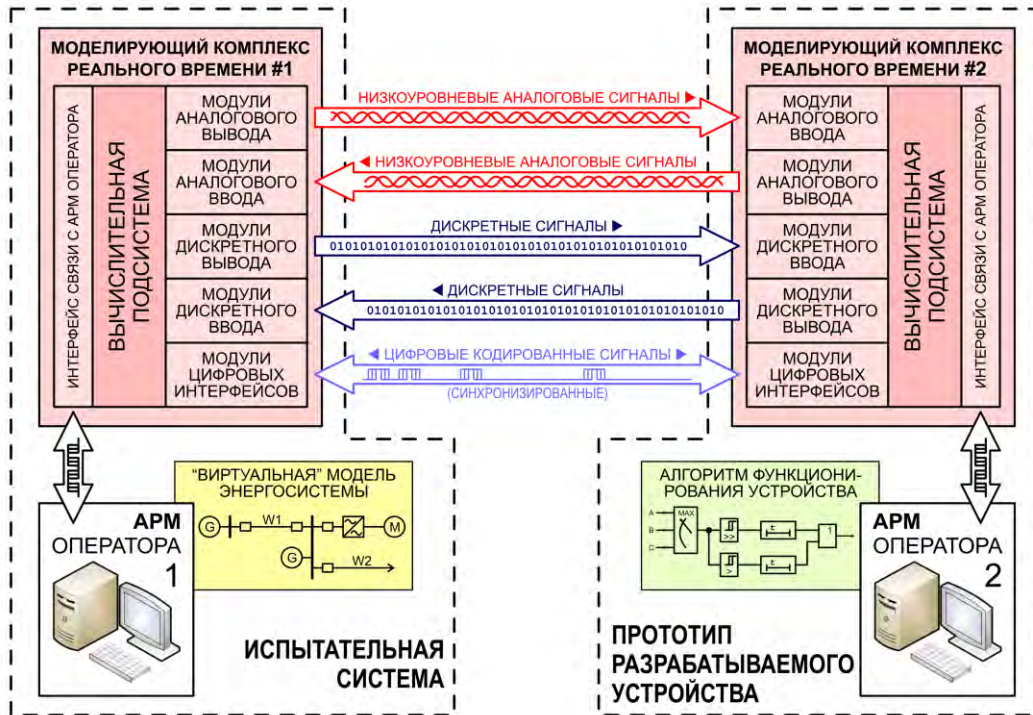


Рис. 4

По завершении отладки разрабатываемое устройство – уже в традиционном исполнении терминала – может быть вновь подключено к модели энергосистемы для осуществления окончательных испытаний, позволяющих учесть все нюансы программной и аппаратной реализации (рис. 5).

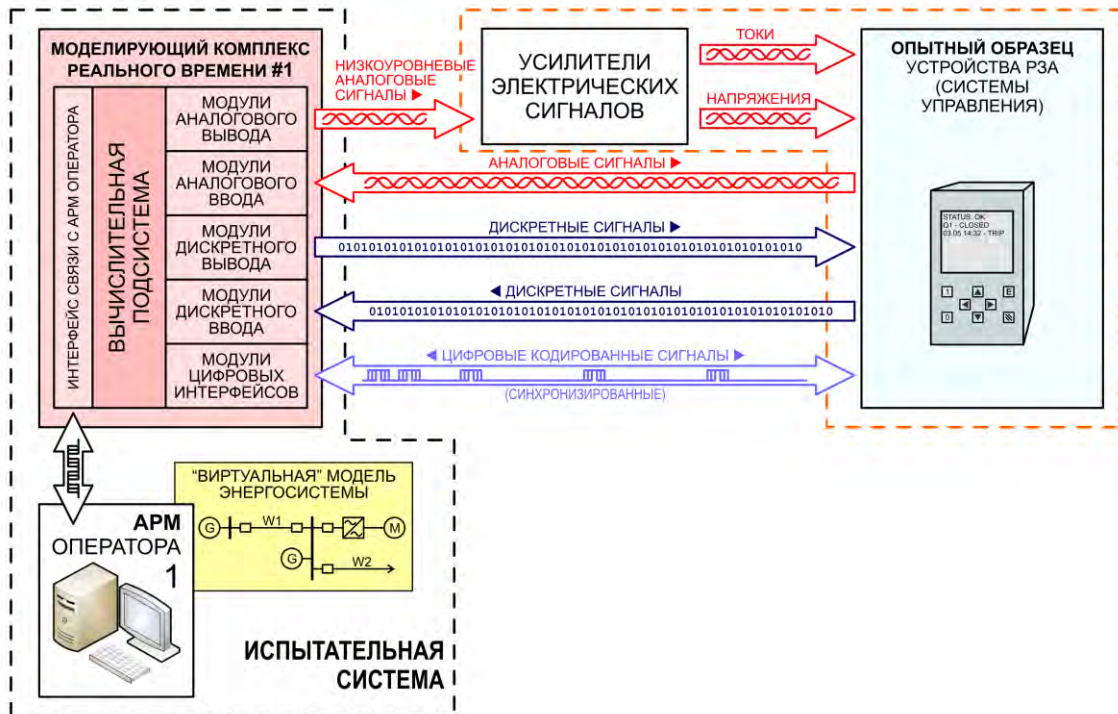


Рис. 5

Рассмотренный подход используется во Всероссийском научно-исследовательском институте релейной защиты при разработке новых устройств релейной защиты и автоматики «РИТМ». В качестве аппаратно-алгоритмической базы разрабатываемых устройств выступает моделирующий комплекс eMEGAsim; цифровые динамические модели энергосистемы реализованы с использованием комплекса RTDS. Модели позволяют исследовать функционирование испытуемых устройств защиты и их прототипов в различных схемно-режимных ситуациях: при одно-, двух- и трехфазных коротких замыканиях с различной величиной апериодической составляющей в токе короткого замыкания, с разновременностью замыкания поврежденных фаз, с учётом насыщения трансформаторов тока и т.п. В качестве примера на рис. 6 приведены графики переходных процессов при трёхфазном коротком замыкании с разновременностью замыкания повреждённых фаз, с подпиткой места КЗ со стороны двигательной нагрузки при испытаниях дифференциальной защиты трансформатора.

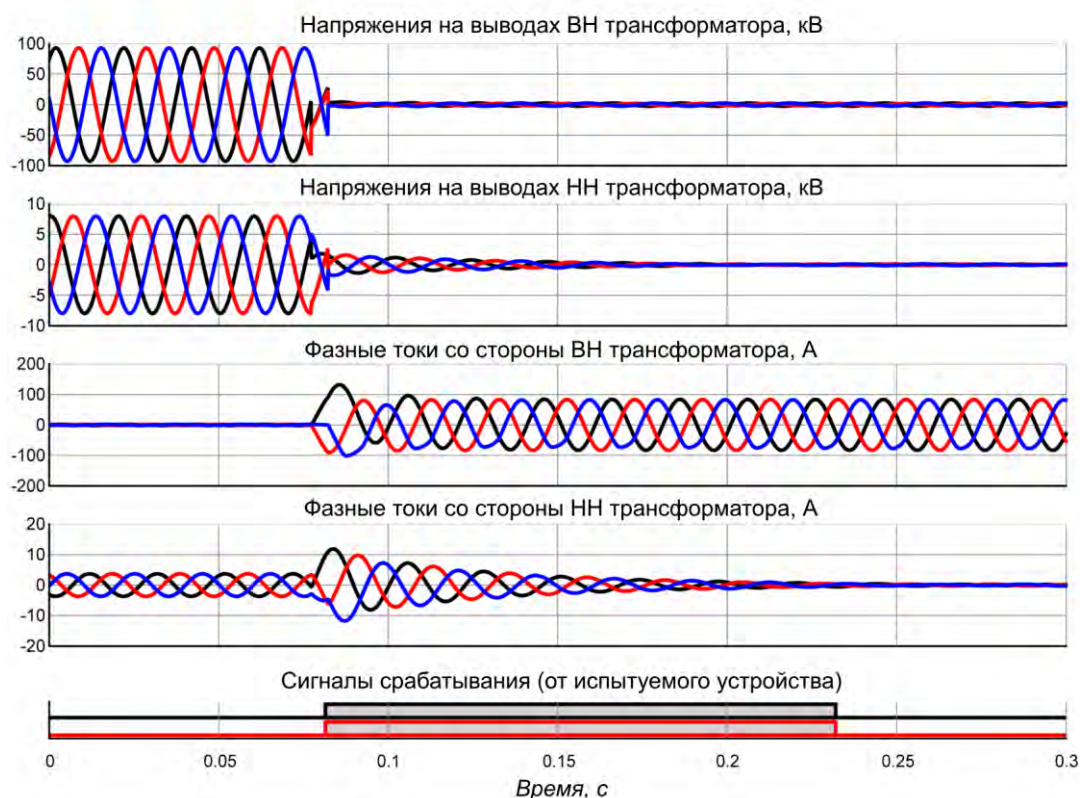


Рис. 6

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Совместное использование моделирующих комплексов реального времени ЕМТ-типа позволяет оптимизировать процесс создания новых устройств релейной защиты, автоматики и управления: сократить сроки осуществления разработки, существенно снизить вероятность пересмотра принятых решений на этапе производства из-за ошибок, допущенных на ранних стадиях разработки.

2) Комбинированное использование инструментов моделирования уже сейчас позволяет осуществлять в режиме реального времени с высокой степенью детализации исследование отдельных фрагментов большой электроэнергетической системы с учётом поведения при возмущениях всех объектов этой системы.

3) Активно развиваются технологии сочетания методов расчета ЕМТ/Phasor в одном моделирующем комплексе. В перспективе следует ожидать появления инструментов, в автоматизированном режиме осуществляющих «разбиение» модели крупной энергосистемы на две подсистемы, одна из которых моделируется с высокой степенью детализации (ЕМТ-методы), а другая – с низкой (Phasor/TS).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Dommel H.W., EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, 4689 W. 12th. Avenue, Vancouver, B.C. V6R 2R7, Canada, 2nd. edition, May 1992.
- [2] Jalili-Marandi V., Ayres F.J., Dufour C., Belanger J. Real-time Electromagnetic and Transient Stability Simulations for Active Distribution Networks // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver, Canada, Juli 2013.
- [3] Saad H., Dufour C., Mahseredjian J., Dennetière S, Nguefeu S. Real Time simulation of MMCs using the State-Space Nodal Approach // International Conference on Power Systems Transients (IPST2013). Vancouver, Canada, Juli 2013.
- [4] Dufour C., Mahseredjian J., Belanger J. A Combined State-Space Nodal Method for the Simulation of Power System Transients, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.26, no.2, April 2011, pp.928-935.
- [5] Watson N.R., Arrillaga J. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation [IET Power and Energy Series; no. 39]. The Institution of Engineering and Technology, London, UK, 2007.
- [6] Jalili-Marandi V., Ayres F.J., Ghahremani E., Belanger J., Lapointe V. A Real-time Dynamic Simulation Tool for Transmission and Distribution Power Systems // Proc. IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, Canada, Juli 2013.



С.3-2. Моделирование сложных динамических режимов с целью испытаний защит синхронного генератора

Ю.В. РОМАНОВ¹, А.В. ШЕВЕЛЕВ¹, А.А. НАВОЛОЧНЫЙ², О.А. ОНИСОВА²
ООО «ИЦ Бреслер»¹, ОАО «ВНИИР»²

Россия

shevelev_av@ic-bresler.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Моделирование в режиме реального времени, защита генератора, RTDS.

1 ВВЕДЕНИЕ

Для современного этапа развития релейной защиты характерна тенденция усложнения алгоритмов защит, направленная на повышение эффективности их функционирования. Обратной стороной этого процесса становится повышение сложности оценки функционирования алгоритмов в широком диапазоне параметров режимов защищаемого оборудования. Зачастую информация о поведении устройства в сложных режимах накапливается только в процессе практического опыта эксплуатации в течение длительного периода времени. Такая практика не позволяет своевременно получить полное представление о поведении устройства на реальном объекте и связана с риском возникновения в энергосистеме ряда опасных режимов, которые можно было бы предотвратить.

Задача апробации алгоритмов функционирования устройств релейной защиты может быть эффективно решена с использованием современных методов моделирования, позволяющих оперативно разрабатывать модели энергосистем под конкретную задачу, выполнять моделирование необходимых схемно-режимных ситуаций, воссоздавая режимы, максимально приближенные к тем, которые имеют место на реальном энергообъекте, получать необходимые данные для анализа поведения испытываемых защит.

В докладе рассматривается методический подход к проведению испытаний с использованием моделирующих комплексов реального времени защит одного из наиболее ответственных объектов электроэнергетики – синхронного генератора; приводятся примеры моделирования ряда режимов с подключением физического образца устройства защиты.

2 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПЫТУЕМОГО УСТРОЙСТВА

В качестве объекта испытаний выступил микропроцессорный терминал «ТОР 300 ЗГ 511» производства ООО «ИЦ «Бреслер» [1], реализующий комплект защит синхронного генератора, функционирование которых исследовалось в рамках проведённой работы:

- продольная дифференциальная токовая защита генератора (ДЗГ);
- двухступенчатая дистанционная защита от многофазных замыканий;
- максимальная токовая защита с минимальным пуском по напряжению;
- максимальная токовая защита с комбинированным пуском по напряжению;
- токовая защита обратной последовательности;
- защита ротора от замыкания на землю в двух точках;

- защита статора от перегрузки;
- защита от несимметричной перегрузки;
- защита от повышения напряжения;
- защита от перевозбуждения;
- защита от асинхронного режима с потерей возбуждения;
- защита от асинхронного режима без потери возбуждения;
- защита от случайного включения генератора в сеть;
- функция блокировки при неисправности цепей напряжения;
- защита генератора в режиме холостого хода с пониженной или повышенной частотой вращения вала.

Основной быстродействующей защитой генератора от многофазных коротких замыканий является продольная дифференциальная токовая защита. Вычислительные ресурсы, которыми обладают современные микропроцессорные средства, позволили внести в неё ряд усовершенствований: повысить её чувствительность к токам КЗ (минимальное значение уставки составляет 0,1 Inом), ввести алгоритмический критерий для отстройки от токов внешних КЗ, сопровождающихся насыщением первичных трансформаторов тока (ТТ), дополнить защиту быстродействующим органом для контроля исправности вторичных цепей тока. Такая функциональная насыщенность, безусловно, требует испытаний защиты перед вводом её в эксплуатацию. Особый интерес вызывает поведение защиты при сложных видах повреждений, в том числе с учетом нелинейных характеристик трехфазных ТТ: в процессе развития повреждений, их перехода из одного вида в другой, при неисправностях во вторичных цепях и т.д.

Тщательной проверки требует поведение защит от асинхронных режимов при развитии качаний и асинхронного хода с учетом переходных процессов в системе. Важной также является проверка в динамических режимах дистанционной защиты, максимальной токовой защиты и токовой отсечки обратной последовательности, осуществляющих ближнее резервирование.

3 ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В ЧАСТИ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

Для осуществления всесторонних динамических испытаний физических образцов устройств релейной защиты в крупнейших энергетических компаниях мира используют специализированные программно-аппаратные моделирующие комплексы реального времени (МКРВ) [2]. Наибольшую известность из них приобрели цифровые МКРВ RTDS (производитель – канадская компания RTDS Technologies Inc.) и eMEGAsim (также канадский разработчик – OPAL-RT Technologies Inc.).

Оба комплекса, имея различающиеся алгоритмические подходы и архитектуру, позволяют оперативно создавать модель электроэнергетической системы под конкретную задачу, обеспечивают взаимосвязь разработанной модели с физическими устройствами релейной защиты (выдачу в аналоговом или цифровом виде рассчитываемых моделью токов и напряжений на подключенные устройства и прием от последних дискретных сигналов срабатывания, блокировки и т.д.), имеют возможность учитывать реакцию испытуемого устройства в работе модели энергосистемы.

Комплексы характеризуются высокой степенью детализации модели электроэнергетической системы, наличием подробных моделей её элементов, учитывающих, в том числе, нелинейные свойства электрических машин и измерительных трансформаторов. Исходное описание модели формируется в системе фазных координат ABC; это даёт возможность учитывать несимметрию и выполнять моделирование сложных видов повреждений. Шаг моделирования (обычно 20-80 мкс) позволяет учитывать характеристики электромагнитных переходных процессов.

В процессе моделирования возможно оперативное изменение схемно-режимных ситуаций, т.е. в модели исследуемой энергосистемы могут выполняться переключения, изменение режимов работы оборудования, ручное регулирование. Благодаря этим

особенностям испытания устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики становится возможным осуществлять в условиях, электрически максимально близких к тем, которые имеют место в реальных энергосистемах.

4 МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПРОВЕДЕНИЮ ИСПЫТАНИЙ

При разработке программ испытаний защит (в том числе и защит генератора) важно предусмотреть возможность варьирования параметров моделируемых режимов; в процессе испытаний этой возможностью следует пользоваться, не ограничиваясь базовым набором экспериментов. Ввиду сложности алгоритмов функционирования современных микропроцессорных защит их «слабые места» могут быть найдены зачастую лишь путём «перебора» многих параметров режима при моделировании и (как и при проведении экспериментов с моделями других видов) немаловажную роль играют квалификация и опыт исследователя, его способность найти потенциально сложные (для испытываемого устройства) режимы.

В общем виде процесс испытаний защиты может включать в себя два этапа, выполняемых обычно циклически. На первом этапе с учетом типов исследуемых защит разрабатывается программа испытаний, определяющая схемы и параметры модели электрической сети, диапазоны их варьирования, набор моделируемых схемно-режимных ситуаций; проводятся испытания устройства в режиме «черного ящика» (фиксируется реакция терминала в целом); разработчиком проводится анализ результатов испытаний.

По результатам анализа при необходимости может быть проведен второй этап испытаний, ориентированный на выявление алгоритмических особенностей отдельных элементов (подпрограмм, фрагментов алгоритма) защиты, – тех, недостатки которых предположительно приводили к некорректной работе устройства в процессе первого этапа испытаний. Такой подход позволяет с оптимальными затратами получать необходимый объем информации для анализа и корректировки алгоритма защиты.

5 ПОДГОТОВКА ПРОГРАММЫ ИСПЫТАНИЙ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Программа испытаний терминала защиты синхронного генератора должна быть ориентирована на исследование его поведения в следующих режимах:

1. «Простые» симметричные и несимметричные режимы коротких замыканий;
2. Сложные виды повреждений:
 - короткие замыкания с разновременностью замыкания поврежденных фаз;
 - короткие замыкания (КЗ), переходящие из одной точки в другую (в том числе, при переходе КЗ вблизи выводов генератора в зону действия продельной защиты);
 - двойные замыкания;
 - внутренние повреждения (междуфазные и витковые замыкания в обмотке статора);
 - наложения нескольких режимов (например, режимов коротких замыканий и электромеханических переходных процессов; короткие замыкания в условиях значительных отклонений частоты от номинального значения в предшествующем повреждению режиме и т.д.);
3. Электромагнитные и электромеханические переходные процессы, не связанные с короткими замыканиями:
 - включение в сеть остановленного и недовозбужденного генератора;
 - неполнофазное включение в сеть остановленного и недовозбужденного генератора;
 - включение генератора в сеть методом самосинхронизации;
 - несинхронное включение генератора в сеть при разности углов между векторами напряжения со стороны генератора и внешней сети 60, 90, 120, 180 градусов;
 - глубокие синхронные качания;
 - асинхронные режимы.
4. Неисправности в цепях тока, напряжения, в обмотке возбуждения.

Целесообразно предусмотреть варьирование следующих параметров режимов повреждений:

- момента (угла) возникновения повреждения по отношению к точке перехода через ноль фазного напряжения в месте короткого замыкания (0 – 360 град.);
- вида КЗ (междуфазное КЗ / КЗ на землю; выбор поврежденных фаз);
- последовательности развития КЗ: разновременности замыкания поврежденных фаз (ориентировочные диапазоны изменения: 0 – 60 мс), времени перехода повреждения из одной точки в другую (ориентировочные диапазоны изменения: 0 – 60 мс);
- переходного сопротивления в месте КЗ (ориентировочные диапазоны изменения: 0 – 5 Ом при междуфазных повреждениях; 0 – 50 Ом при замыканиях на землю).

При проведении испытаний защит генератора (в особенности с целью исследования работы дифференциальной защиты) следует учитывать возможность насыщения трансформаторов тока. Для получения различных характеристик процессов, связанных с насыщением, целесообразно варьировать величину вторичной нагрузки, соотношения активного и индуктивного сопротивлений во вторичной цепи трансформатора тока, уровень остаточной намагниченности стали.

6 СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

С целью проведения испытаний устройства защиты синхронного генератора на базе программно-аппаратного комплекса RTDS реализована модель электростанции, содержащей два блока «генератор-трансформатор», и работающей параллельно с энергосистемой на уровне сети 110 кВ.

Схема модели приведена на рис. 1.

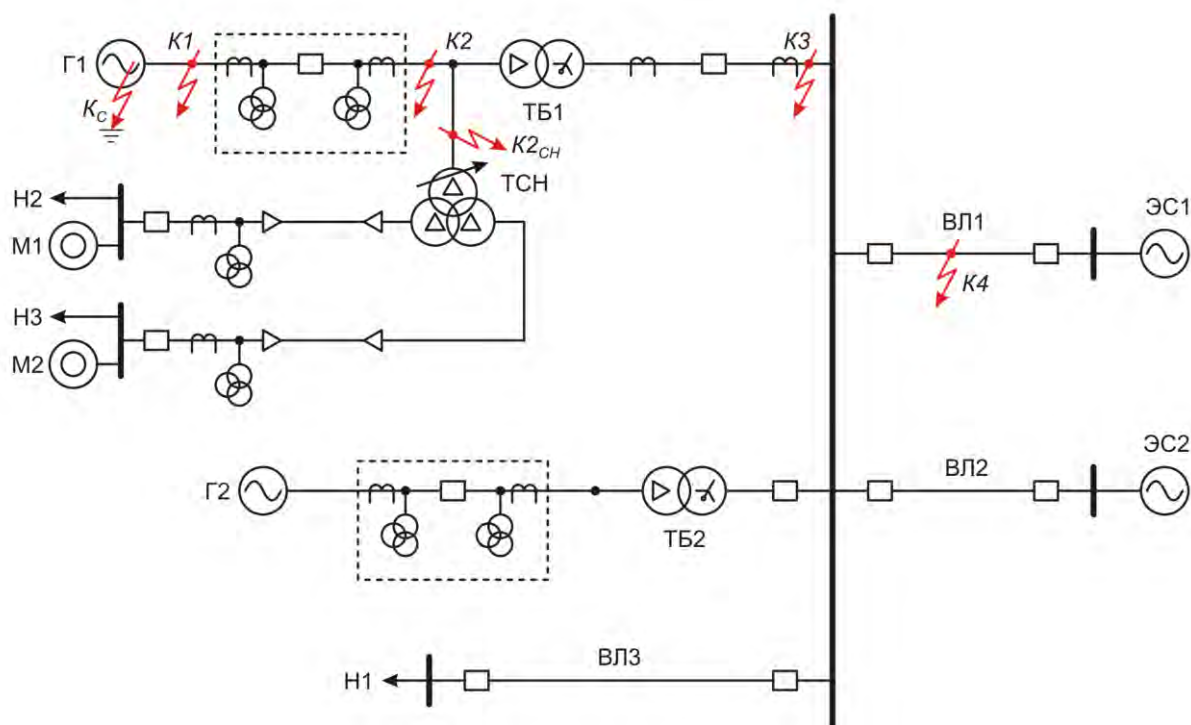


Рис. 1

В состав модели входят генераторы Г1 и Г2 (со своими системами возбуждения, регуляторами возбуждения, турбинами, системами регулирования скорости и мощности), блочные трансформаторы (ТБ1, ТБ2), трансформатор собственных нужд (ТСН), нагрузка собственных нужд (статические электроприемники Н2, Н3; эквивалентные электродвигатели М1, М2), воздушные линии электропередачи 110 кВ (ВЛ1, ВЛ2, ВЛ3), эквивалентные источники энергосистем (ЭС1, ЭС2), эквивалентная нагрузка 110 кВ (Н1).

Обобщенные параметры схемы приведены в табл. 1.

Ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме на шинах эквивалентной энергосистемы ЭС-1, кА	22
Ток трехфазного короткого замыкания в максимальном режиме на шинах эквивалентной энергосистемы ЭС-2, кА	13
Номинальная мощность генератора Г1, МВА	100
Номинальная мощность генератора Г2, МВА	156,25
Номинальная мощность трансформатора блока ТБ1, МВА	100
Номинальная мощность трансформатора блока ТБ2, МВА	160
Номинальное напряжение обмотки высшего/низшего напряжения трансформатора блока ТБ1, кВ	121/10,5
Номинальное напряжение обмотки высшего/низшего напряжения трансформатора блока ТБ2, кВ	121/10,5

Табл. 1

Созданная модель позволяет оперативно изменять параметры текущей схемно-режимной ситуации; включать/отключать линии электропередачи, трансформаторы, генераторы (последние могут включаться с использованием модели устройства точной синхронизации при заданном значении угла между э.д.с. на выводах генератора и э.д.с. эквивалентной энергосистемы, а также «вручную» с контролем условий величин напряжения и разницы частот со стороны генератора и энергосистемы); изменять загрузку генератора и напряжение на его выводах; осуществлять пуск генератора; инициировать возникновение повреждений (с заданием момента времени возникновения повреждения относительно точки перехода через ноль напряжения фазы «А», выбором поврежденных фаз и одновременности их замыкания, с переходом КЗ из одной точки в другую по одной, двум или трем фазам).

7 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Результаты испытаний в целом показали корректную работу комплекса защит. Выявленные отдельные особенности функционирования алгоритмов были тщательно исследованы; в необходимых случаях в алгоритм были внесены соответствующие корректировки. Ниже рассмотрен ряд наиболее интересных режимов, в которых исследовалось поведение испытываемого терминала.

Рис. 2 иллюстрирует опыт внутреннего многофазного КЗ на выводах генератора. Ток в нейтрали генератора и дифференциальный ток являются нелинейными (содержат, в частности, существенный уровень второй гармоники). Это обусловлено различием параметров генератора (а, соответственно, и его модели) по продольной и поперечной осям. Следует отметить, что апериодическая составляющая, появляющаяся в токе со стороны нейтрали при внутренних КЗ, способствует насыщению трансформаторов тока, что, в свою очередь, дополнительно изменяет гармонический состав тока, замеряемого защитой, приводит к появлению существенных нелинейных токов небаланса, сравнимых по величине с уровнем тока внешнего КЗ.

Насыщение трансформаторов тока из-за наличия значительных апериодических составляющих с большими постоянными времени при внешних КЗ может повлиять на надежность несрабатывания защиты (прежде всего, ДЗГ): при насыщении ТТ одного из плеч появляются существенные нелинейные токи небаланса. Даже при использовании ТТ одинакового типа, с одним и тем же коэффициентом трансформации (на реальных объектах это, как правило, так) из-за различной вторичной нагрузки, различий реальных характеристик ТТ, а также из-за влияния внешних магнитных полей один из ТТ может войти в режим насыщения на один-два периода ранее другого. ДЗГ должна быть отстроена по принципу действия от таких режимов (рис. 3) путем применения специальных критериев блокировки при насыщении ТТ.

Проведенные исследования режимов, связанных с близкими КЗ, показали необходимость более глубокого рассмотрения вопросов ближнего резервирования при симметричных КЗ, выполняемого, как правило, с использованием дистанционной защиты.

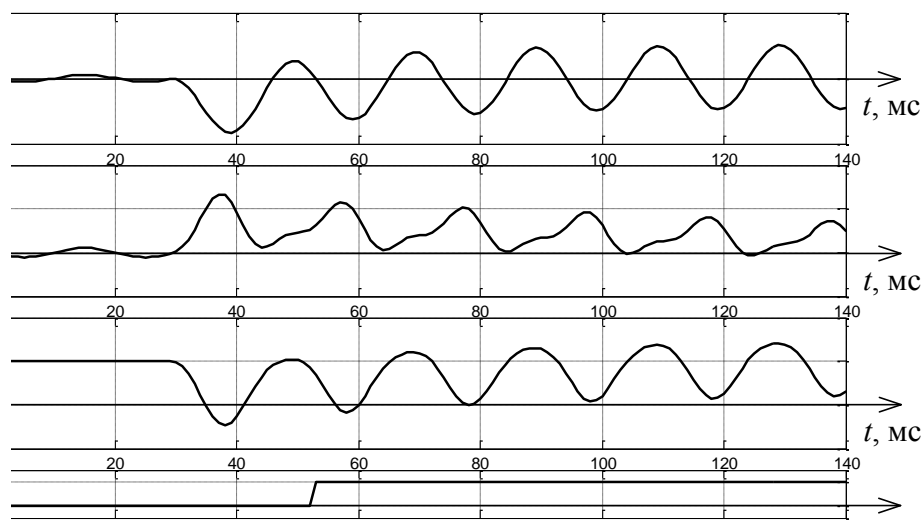


Рис. 2: Осциллограмма трёхфазного металлического внутреннего КЗ на выводах обмотки статора:
 $i_{A,B}$ – ток ф. А со стороны линейных выводов генератора;
 $i_{A,H}$ – ток ф. А со стороны нулевых выводов генератора;
 $i_{A,диф}$ – дифференциальный ток ф. А.

В настоящее время на генераторах используются статические системы самовозбуждения без последовательных вольтодобавочных трансформаторов. В условиях практически полного исчезновения напряжения на выводах генератора при симметричных КЗ эти системы не способны длительно поддерживать уровень тока замыкания. Так на рис. 4 приведена осциллограмма вторичного тока ф. А при металлическом трёхфазном КЗ на линейных выводах генератора. Приблизительно через две секунды с момента возникновения повреждения величина тока КЗ становится ниже значения тока точной работы дистанционной защиты, что может привести к её возврату до истечения установленной выдержки времени.

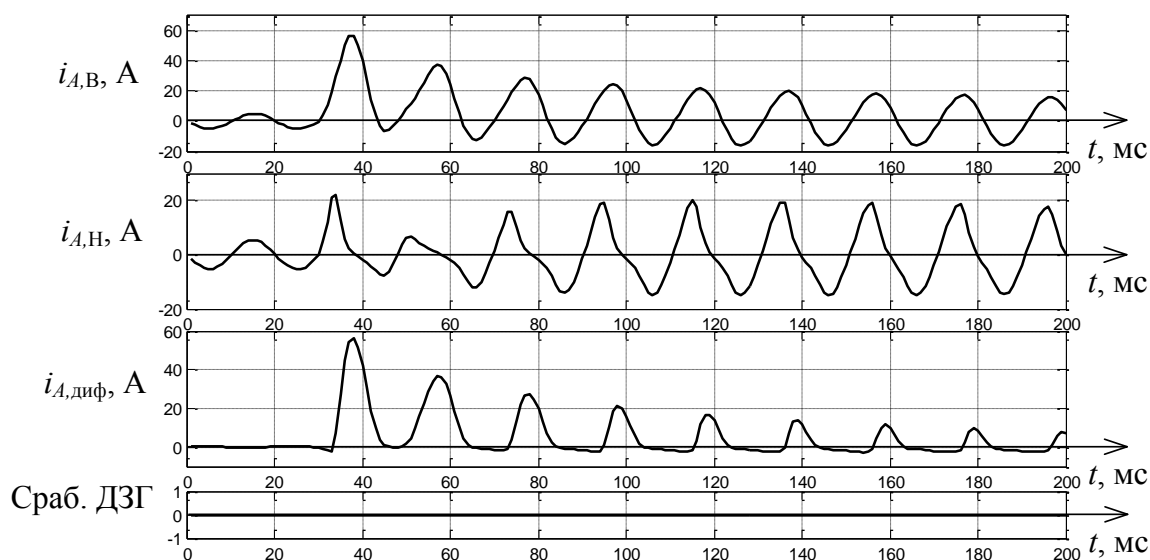


Рис. 3: Осциллограмма внешнего трёхфазного КЗ на выводах генератора с учётом насыщения ТТ

Надёжное ближнее резервирование при симметричных КЗ (подтверждено испытаниями) может быть обеспечено путём применения двухступенчатой дистанционной защиты при соответствующей её настройке.

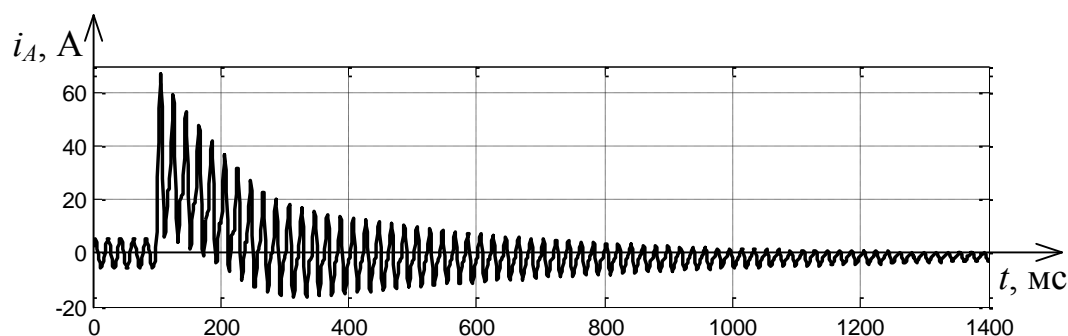


Рис. 4: Осциллограмма тока ф. А при трёхфазном КЗ на линейных выводах генератора

Одними из самых сложных для исследования являются защиты от асинхронных режимов. Сложность заключается в том, что при моделировании нужно учитывать не только работу системы возбуждения и автоматики турбины, но и специфику электромеханических процессов в синхронной электрической машине. К примеру, асинхронный режим без потери возбуждения должен рассматриваться как сочетание двух режимов: условного со скольжением при наличии постоянного тока в обмотке возбуждения, но в отсутствие переменных токов частоты скольжения во всех контурах ротора и режима потери возбуждения. Вследствие этого при моделировании данного режима наблюдаются характерные признаки. Один из них заключается в том, что сигнал активной мощности содержит не только переменную составляющую с частотой скольжения, но также и постоянную составляющую, обусловленную асинхронным моментом на валу генератора (рис. 5).

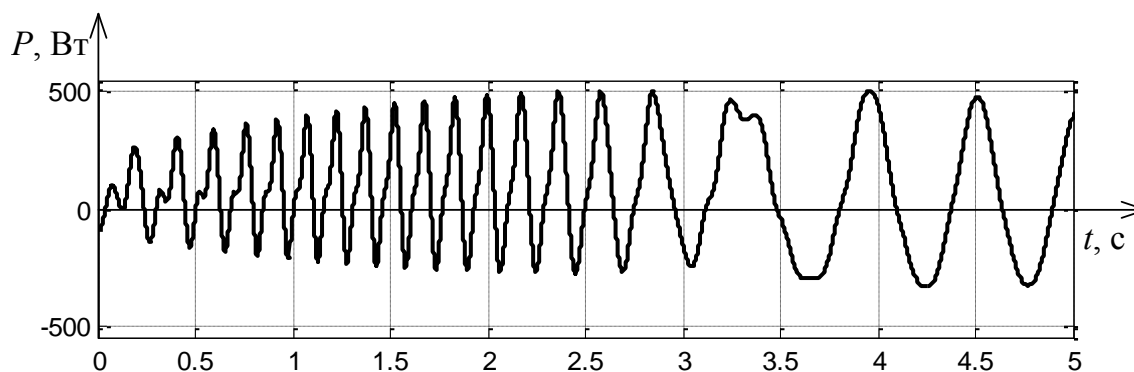


Рис. 5: Осциллограмма активной мощности при асинхронном ходе

На рис. 6 приведена одна из осциллограмм асинхронного хода, возникающего после отключения КЗ на стороне ВН блока. Здесь $\Delta\varphi_{ВЛ}$ – разность фаз напряжений по концам отходящей линии, $\Delta\varphi_{ТБ}$ – разность фаз напряжений по концам трансформатора блока. Положение центра качаний можно отследить следующим образом. Если $\Delta\varphi_{ВЛ}$ изменяется в полном диапазоне от -180 до 180 градусов, то центр качаний находится на линии, если в этом диапазоне изменяется $\Delta\varphi_{ТБ}$, то центр качаний находится в блоке. Как видим, в рассматриваемой осциллограмме центр качаний сначала располагается в генераторе, затем постепенно перемещается в линию. Отметим, что защита от асинхронного режима без потери возбуждения срабатывает при первом же периоде качаний, поскольку выполняются все условия для её срабатывания.

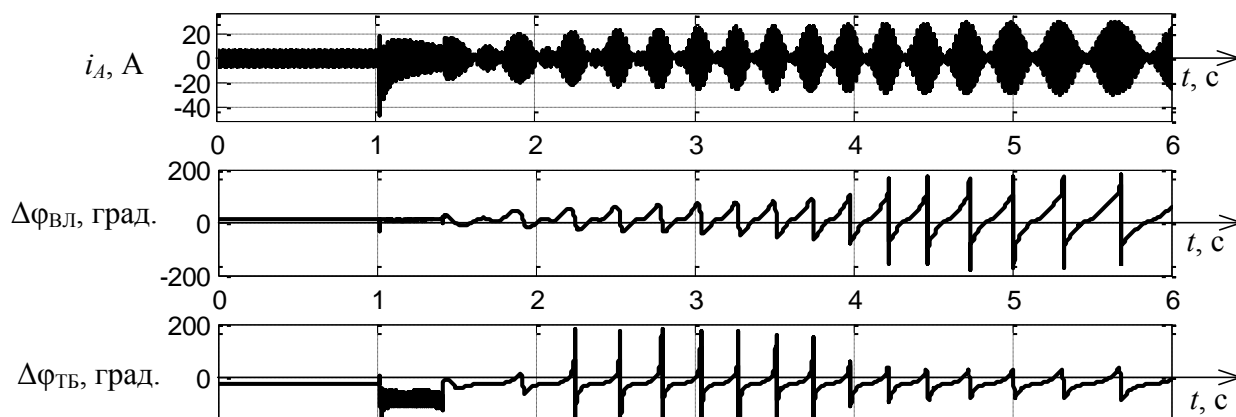


Рис. 6: Осциллограмма асинхронного хода после КЗ

Рассмотрим режим непреднамеренного включения в сеть остановленного генератора, который представляет для генератора большую опасность и требует быстрого отключения выключателя. Пример осциллограммы тока и сигналов действия защит в этом режиме приведён на рис. 7. При случайном включении выключателя генератор запускается асинхронно, а это является условием для срабатывания защиты обратной активной мощности, защиты от потери возбуждения и резервной защиты от многофазных КЗ. В данном случае из перечисленных сработала дистанционная защита (ДЗ) и защита от потери возбуждения (ЗПВ). Время срабатывания обеих (6,5 с и 9,1 с) нельзя считать удовлетворительным для предотвращения наносимого ущерба от рассматриваемого аномального режима. Быстрое отключение генератора обеспечивает специальная защита от случайного включения (ЗНВГ) с временем срабатывания не более 0,2 с.

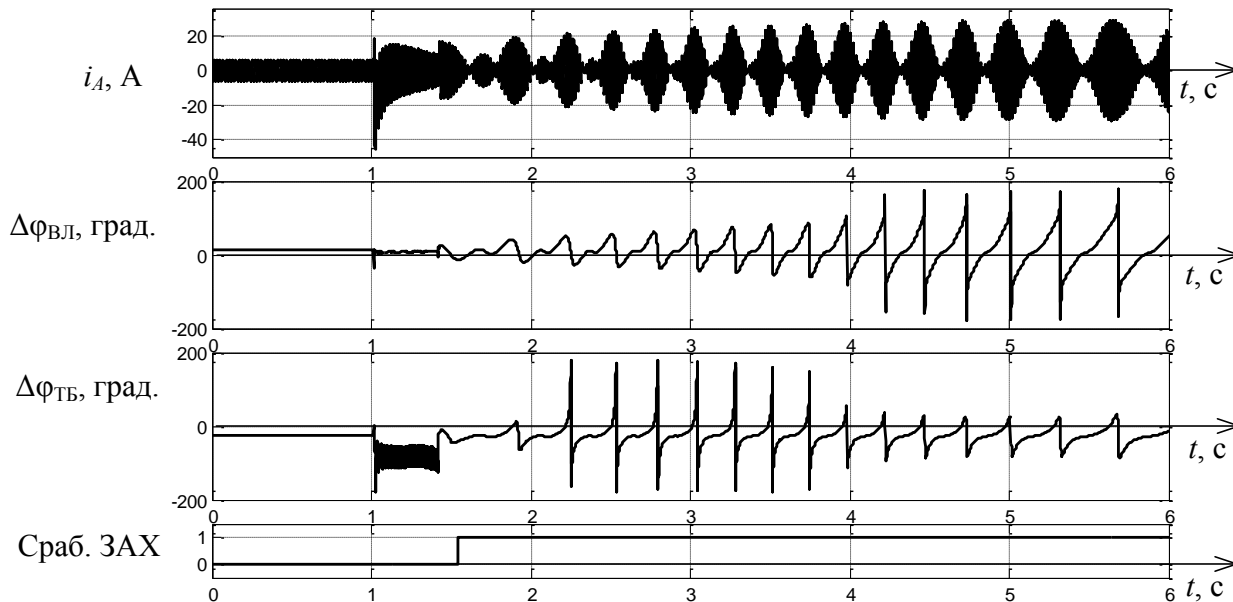


Рис. 7: Осциллограмма непреднамеренного включения генератора в сеть

8 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирующие комплексы реального времени представляют собой эффективный инструмент для исследования физических образцов устройств релейной защиты (прежде всего, их алгоритмических особенностей). Подход к проведению таких исследований должен быть основан на выявлении ключевых факторов (параметров модели), оказывающих влияние на конечный результат, варьировании этих параметров в «неблагоприятную» сторону.

В докладе рассмотрены особенности проведения испытаний устройства защиты синхронного генератора «ТОР 300 ЗГ 511» с использованием цифровой динамической модели комплекса RTDS.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Романов Ю.В., Шевелев А.В. Особенности реализации защит блока генератор-трансформатор // Релейная защита и автоматизация, 2014, № 3(16), С. 56-60.
- [2] Форсайт П. Применение цифровых симуляторов реального времени в энергетических компаниях / П. Форсайт, Р. Кюффель, С. Питерс // Релейщик. – 2014. – №2. – С.34-37.



С.3-3. Моделирование релейной защиты для задач адекватного воспроизведения переходных процессов в электроэнергетических системах

М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков, Н.Ю. Рубан, А.О. Сулайманов
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»
Россия
andreevmv@tpu.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Моделирование, релейная защита, адекватность, переходные процессы.

1 ВВЕДЕНИЕ

В силу единства, непрерывности и параллельности генерации, распределения и потребления электроэнергии все участвующее в данном процессе оборудование: первичные двигатели, генераторы, трансформаторы, линии электропередачи, разнообразные электропотребители и множество другого основного и вспомогательного оборудования постоянно связано между собой в нормальных и аварийных режимах их работы.

Поскольку подавляющее большинство этого оборудования представляет собой динамические элементы, к тому же преимущественно нелинейные и с весьма значительным диапазоном постоянных времени, любая современная электроэнергетическая система (ЭЭС) образует большую, многопараметрическую, жесткую (отношение наибольшей постоянной времени к наименьшей >10), нелинейную, динамическую систему. В связи с этим адекватное моделирование процессов, протекающих в оборудовании и ЭЭС в целом, представляет собой нетривиальную задачу. При этом в большинстве работ, посвященных её решению, основное внимание уделяется моделированию силового оборудования ЭЭС, а устройства релейной защиты (РЗ) моделируются упрощено. В то же время характер переходных процессов при различных возмущениях в реальной энергосистеме часто зависит от момента срабатывания устройств РЗ и действия противоаварийной автоматики. Это в том числе относится и к электромеханическим переходным процессам, продолжительность и характер которых определяет последующий режим работы и устойчивость энергосистемы.

Вышесказанное связано с тем, что в настоящее время для математического моделирования режимов и процессов в оборудовании и ЭЭС в целом преимущественно применяются программные и программно-технические комплексы, в которых для расчета системы дифференциальных уравнений используются численные методы. Численное моделирование, в силу объективно высокой адекватности своей методической и инструментальной основы статическим задачам, подобным расчетам установившихся режимов ЭЭС, обеспечивает их успешное и эффективное решение, а также перспективу дальнейшего совершенствования программных средств данной специализации параллельно с развитием средств численного моделирования. Однако моделирование переходных процессов ЭЭС с применением численных методов сопряжено с совершенно иной, принципиально

противоположной ситуацией, порождающей необходимость глубокой декомпозиции процессов и упрощения математической модели ЭЭС, а также существенных ограничений жесткости, дифференциального порядка этих моделей и длительности воспроизводимых процессов. Причем, как показывает представленная хронология развития программных средств данной специализации, указанная ситуация весьма слабо зависит от существующего развития методической и инструментальной основы цифрового моделирования. Причиной этого является наличие ограничительных условий численных методов [1]: решения дифференциального уравнения должны удовлетворять условию Липшица, длина интервала решения ограничивается по условию теоремы Даламбера и др.

Разработанный в Энергетическом институте Томского политехнического университета Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС), основанный на концепции гибридного моделирования [2], «освобожден» от обозначенных выше ограничений.

2 ВСЕРЕЖИМНЫЙ МОДЕЛИРУЮЩИЙ КОМПЛЕКС РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ЭЭС

ВМК РВ ЭЭС [3, 4] представляет собой параллельную, многопроцессорную, программно-техническую систему реального времени гибридного типа (рисунок 1). Он объединяет в себе адаптируемую совокупность специализированных гибридных процессоров (СП) всех элементов моделируемой схемы ЭЭС и информационно-управляющую систему.

ВМК РВ ЭЭС обладает следующими свойствами и возможностями:

1. Все СП строятся по единому принципу, согласно которому каждый из них содержит соответствующий решаемой системе уравнений сопроцессор (СП), в общем случае составной, и унифицированную периферию, включающую программно-аппаратный интерфейс локальной компьютерной сети, продольные и поперечные цифруемые пофазные коммутаторы.

2. Все СП в СП также строятся по единому принципу, в соответствии с которым каждый из них представляет собой работающую под управлением микропроцессора(-ов) параллельную цифро-аналоговую структуру, обеспечивающую:

1) непрерывное и методически точное решение в реальном времени и на неограниченном интервале универсальной высокоточной системы уравнений моделируемого вида элементов: энергоблока, трансформатора, линии электропередачи и др.;

2) преобразование формы представления информации: цифро-аналоговое, аналого-цифровое, математическое аналоговое-трёхфазное модельное физическое;

3) автоматизированное и автоматическое управление параметрами, настройками, продольными и поперечными коммутациями фаз и др.;

4) моделирование РЗ и ПА, систем управления воспроизводимого элемента ЭЭС и др.;

3. Трёхфазные входы/выходы различных СП через коммутатор трёхфазных узлов (КТУ) объединяются согласно моделируемой схеме ЭЭС, а информационно микропроцессоры всех СП соединены локальной сетью (ЛКС) с серверной ЭВМ.

4. На серверной ЭВМ устанавливается специализированное программное обеспечение (СПО) ВМК РВ ЭЭС, в котором создаются базы данных, разнообразный программный инструментарий и в среде которого реализуются все информационно-управляющие возможности комплекса.

5. Наряду с серверными функциями, сервер может выполнять функции автоматизированного рабочего места пользователя, в частности администратора ВМК РВ ЭЭС, для которого открыт полный доступ ко всем информационно-управляющим возможностям последнего.

6. Сервер ВМК РВ ЭЭС может быть подключен к внешней компьютерной сети (ВКС), в которой размещены клиентские компьютеры и на которых может быть установлено СПО клиента ВМК РВ ЭЭС, в том числе с регламентированными и защищенными уровнями доступа к информационно-управляющим возможностям, текущим и архивным данным.

7. Для информационно-управляющего и физического взаимодействия с реальным оборудованием: устройствами релейной защиты и автоматики, оперативным информационным комплексом (ОИК), различными информационно-управляющими системами и другими

внешними средствами (ВС), разработаны и используются соответствующие интерфейсные программные и программно-технические средства (ИПТ), имеющие для физического взаимодействия с внешними средствами согласующие усилители и информационные взаимосвязи с сервером и СП по локальной и внешним компьютерным сетям.

8. Заложенные в ВМК РВ ЭЭС принципы построения исключают методическую ошибку решения математических моделей элементов и соответственно совокупной модели ЭЭС в целом, безотносительно к дифференциальному порядку, жёсткости и интервалу решения. Поэтому, точность решения гарантирована и определяется только инструментальной погрешностью аппаратной части комплекса, минимизация которой обеспечивается применением прецизионных интегральных компонентов.

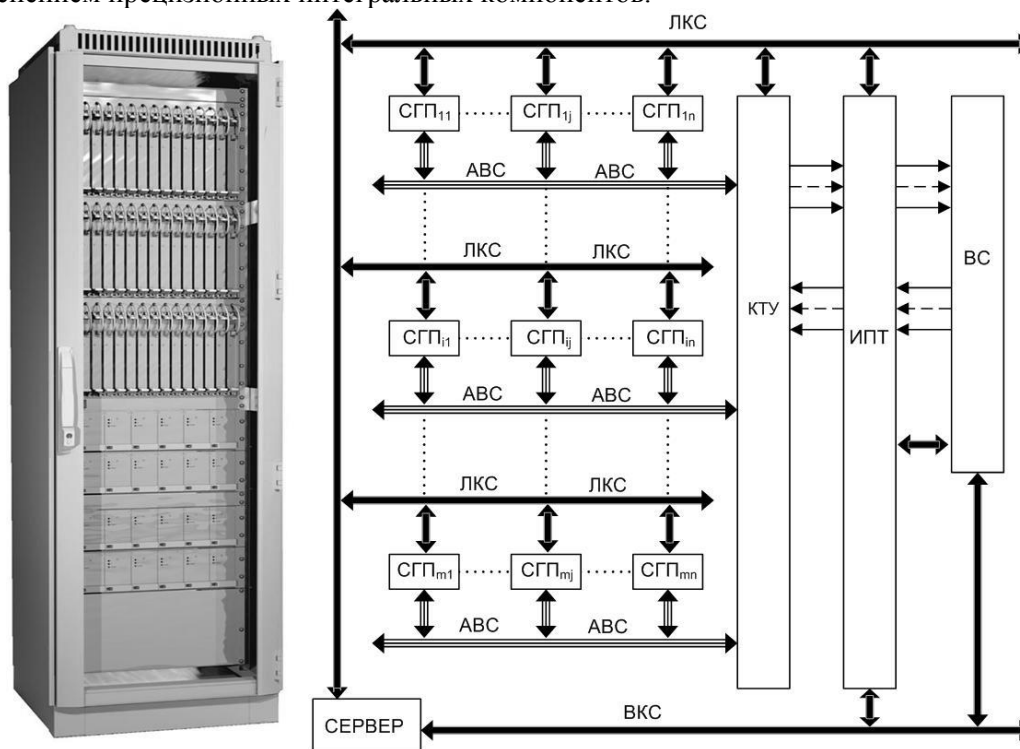


Рис. 1: Внешний вид и структурная схема ВМК РВ ЭЭС

3 ДЕТАЛИЗИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Уникальные свойства и возможности ВМК РВ ЭЭС, кратко обозначенные выше, позволяют интегрировать в комплекс (как на уровне Сервера, так и в микроконтроллеры СГП) математические модели релейной защиты и автоматики, учитывающие все ключевые программно-аппаратные особенности реализации конкретных устройств, а также процессы в измерительных трансформаторах тока и напряжения – детализированные модели [5, 6]. Объем данной статьи не позволяет привести всю информацию по данной теме, поэтому ниже приведены фрагменты результатов моделирования дифференциальной защиты трансформатора на реле типа ДЗТ-21/ДЗТ-23.

Исходной формой математического описания функционирования защиты, позволяющей производить анализ во временной и частотной областях, является передаточная функция (ПФ), наиболее эффективным методом получения которой является метод направленных графов [7]. Для составления ПФ схемы ДЗТ возможны два подхода: 1) рассматривать схему устройства в целом, не структурируя; 2) условно разделив принципиальную схему и соответственно схему замещения на функциональные фрагменты, последовательно математически описывать каждый такой фрагмент с учетом всех взаимосвязей. Недостатком первого варианта является то, что при моделировании относительно больших схем с переменными параметрами математическая модель получается громоздкой и сложной. Второй вариант позволяет создать гибкую модель

для любой РЗ, однако, увеличивается шанс появления ошибки при эквивалентировании схемы. В представленных исследованиях выбран второй вариант.

Для моделирования обозначенной защиты в её схеме помимо ИТТ выделены следующие фрагменты: рабочая цепь; дифференциальная отсечка; цепь торможения по второй гармонике (ЦТВГ); цепь процентного торможения; реагирующий орган; выравнивающий автотрансформатор (АТ: АТ-31 или АТ-32); приставка дополнительного торможения.

В состав ЦТВГ входит фильтр второй гармоники (ФВГ), который для удобства и информативности он выделен в отдельный фрагмент.

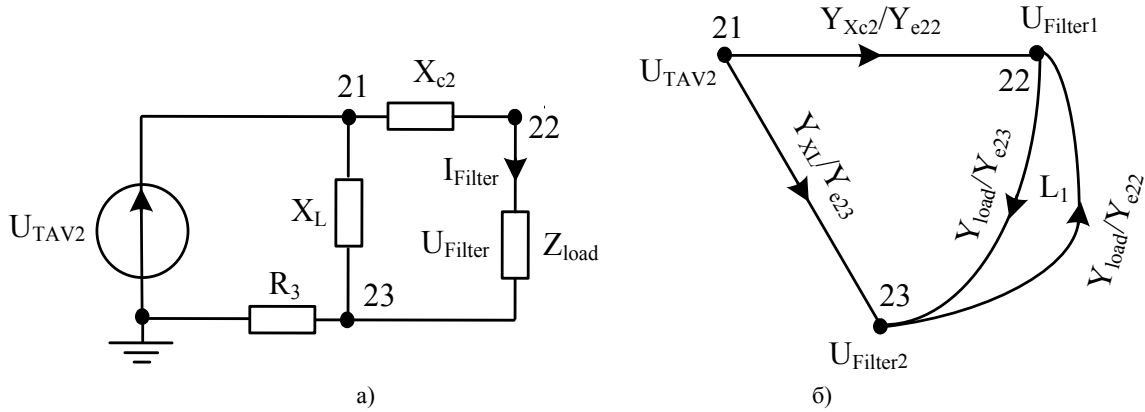


Рис. 2: Схема замещения (а) и граф (б) фильтра второй гармоники: U_{TAV2} – напряжения на выходе трансреактора; Z_{load} – сопротивление нагрузки; U_{Filter} , I_{Filter} – напряжение и ток на выходе фильтра; X_L – индуктивное сопротивление

ПФ для схемы на рисунке 2:

$$W_{Filter}(p) = \frac{U_{Filter}(p)}{U_{TAV2}(p)} = \frac{\frac{Y_{Xc2}}{Y_{e22}} + \frac{Y_{XL}}{Y_{e23}} \cdot \frac{Y_{Load}}{Y_{e22}} - \frac{Y_{XL}}{Y_{e23}} - \frac{Y_{Xc2}}{Y_{e22}} \cdot \frac{Y_{Load}}{Y_{e23}}}{1 - L_1} =$$

$$= \frac{K_1 \cdot p^3 + K_2 \cdot p^2}{K_3 \cdot p^3 + K_4 \cdot p^2 + K_5 \cdot p + K_6},$$

где где $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ – коэффициенты, определяемые RLC-параметрами схемы ФВГ ДЗТ-21.

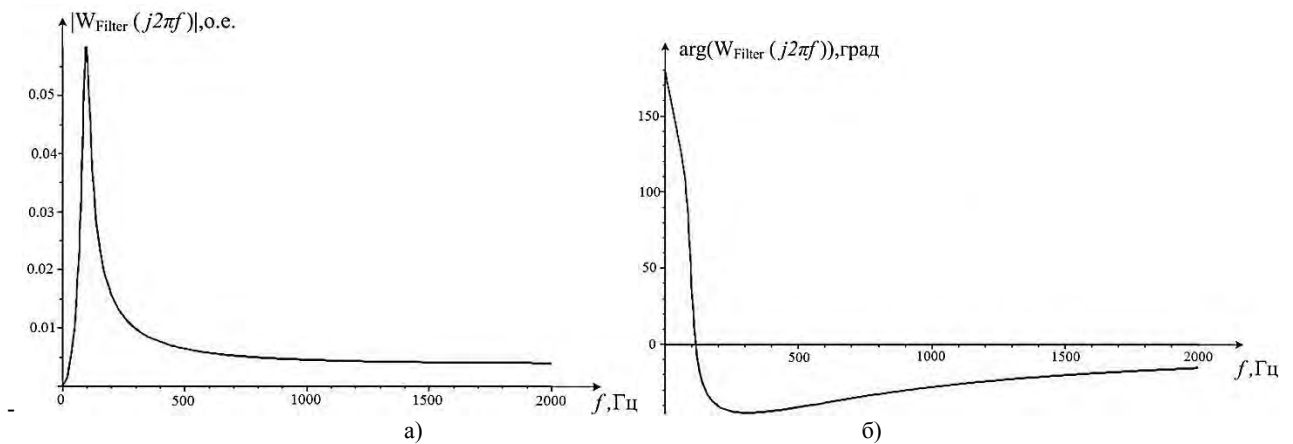


Рис. 3: Амплитудно-частотная (а) и фазо-частотная (б) фильтра второй гармоники

На основе ПФ составляется дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^3(u_{Filter}(t) \cdot K_3 - u_{TAV2}(t) \cdot K_1)}{dt^3} + \frac{d^2(u_{Filter}(t) \cdot K_4 - u_{TAV2}(t) \cdot K_2)}{dt^2} + \frac{d(u_{Filter}(t) \cdot K_5)}{dt} + u_{Filter}(t) \cdot K_6 = 0$$

Реализация синтезированных математических моделей ДЗТ осуществляется путем трансформации математических моделей, представленных в виде системы дифференциальных уравнений, в программные коды и их интеграции в ВМК РВ ЭЭС. В текущей версии решение математических моделей реализовано методом Эйлера, использование которого позволяет предельно минимизировать требования к вычислительным ресурсам. В перспективе планируется применение для этих целей более точного метода. Для учета нелинейности намагничивания сердечника ИТТ и промежуточных преобразователей по мгновенному значению тока намагничивания, который определяется из уравнения баланса магнитодвижущих сил, в соответствии с зависимостью $Z_{\mu} = f(i_{\mu})$, рассчитанной из $B = f(H)$, выбирается сопротивление цепи намагничивания.

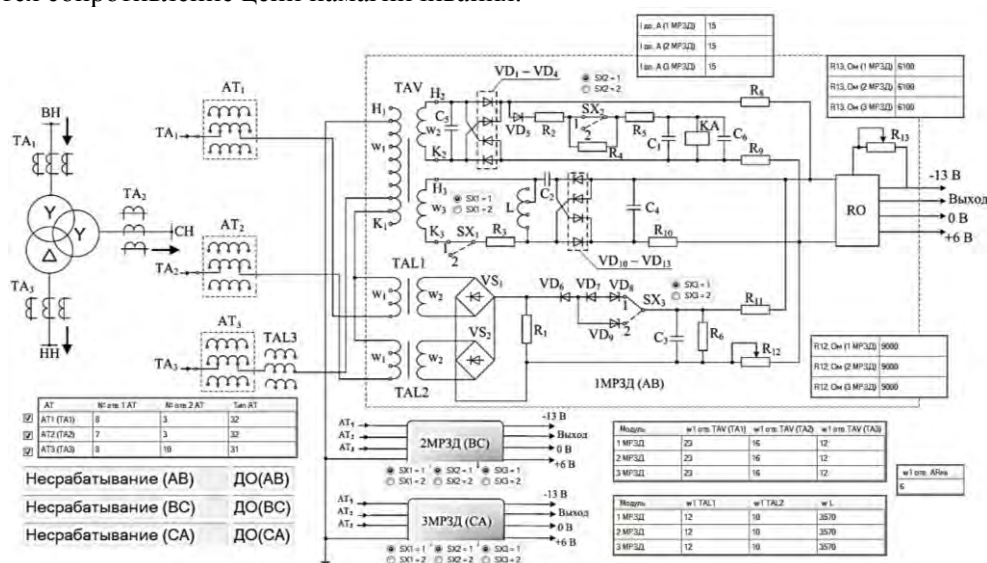


Рис. 4: Окно управления моделью дифференциальной защиты трансформатора на реле ДЗТ-21/ ДЗТ-23

Следующий раздел экспериментально подтверждает актуальность и необходимость использования детализированных математических моделей.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проведены на ВМК РВ ЭЭС с помощью учебной модели энергосистемы, фрагмент однолинейной схемы которой представлен на рис. 5. На рис. 6 и 7 представлены осциллограммы фазных токов линии ВЛ-210 и напряжений на выводах высокого напряжения (ВН) автотрансформатора АТ-5 подстанции ПС4 при логическом учете и соответственно детальном моделировании функционирования основной защиты АТ-5 - дифференциальной защиты трансформатора на реле ДЗТ-21. Ход эксперимента следующий: при возникновении двухфазного короткого замыкания (КЗ) на выводах ВН автотрансформатора АТ-5 происходит срабатывание РЗ АТ, при этом на воздушной линии электропередачи напряжением 220 кВ возникают синхронные качания. В первом случае (рис. 6) функционирование ДЗТ-21 реализовано лишь логически, посредством учета времени срабатывания защиты (25 мс) и времени срабатывания выключателей (40 мс). При этом синхронные качания, возникшие на ВЛ-210, имеют незначительную интенсивность. В случае использования детализированной математической модели ДЗТ-21 при том же времени срабатывания выключателей (40 мс) время срабатывания ДЗТ-21 составило 48 мс, что привело к более длительному режиму существования КЗ, и как следствие послужило причиной возникновения более глубоких синхронных качаний на линии ВЛ-210 (рис. 7).

Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
01 – 05 июня 2015 г., Сочи

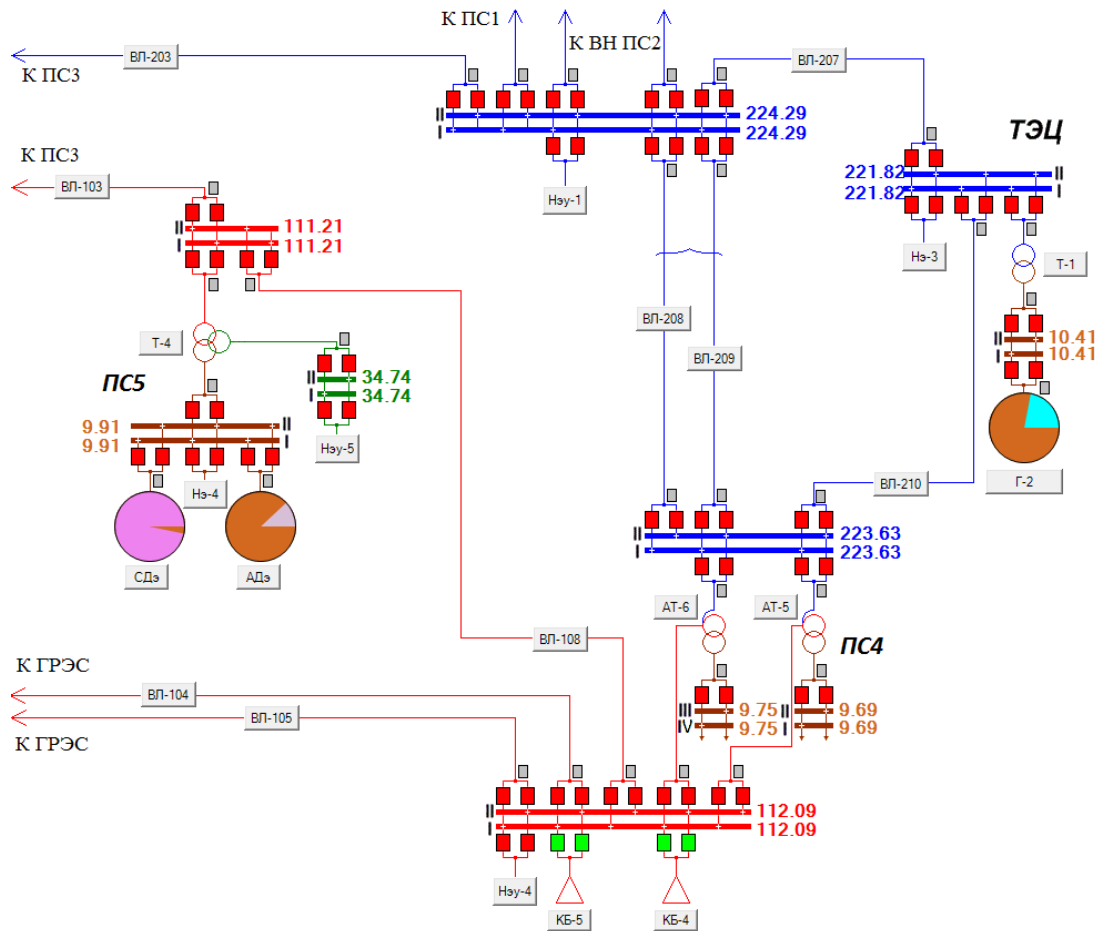


Рис. 5: Фрагмент моделируемой энергосистемы

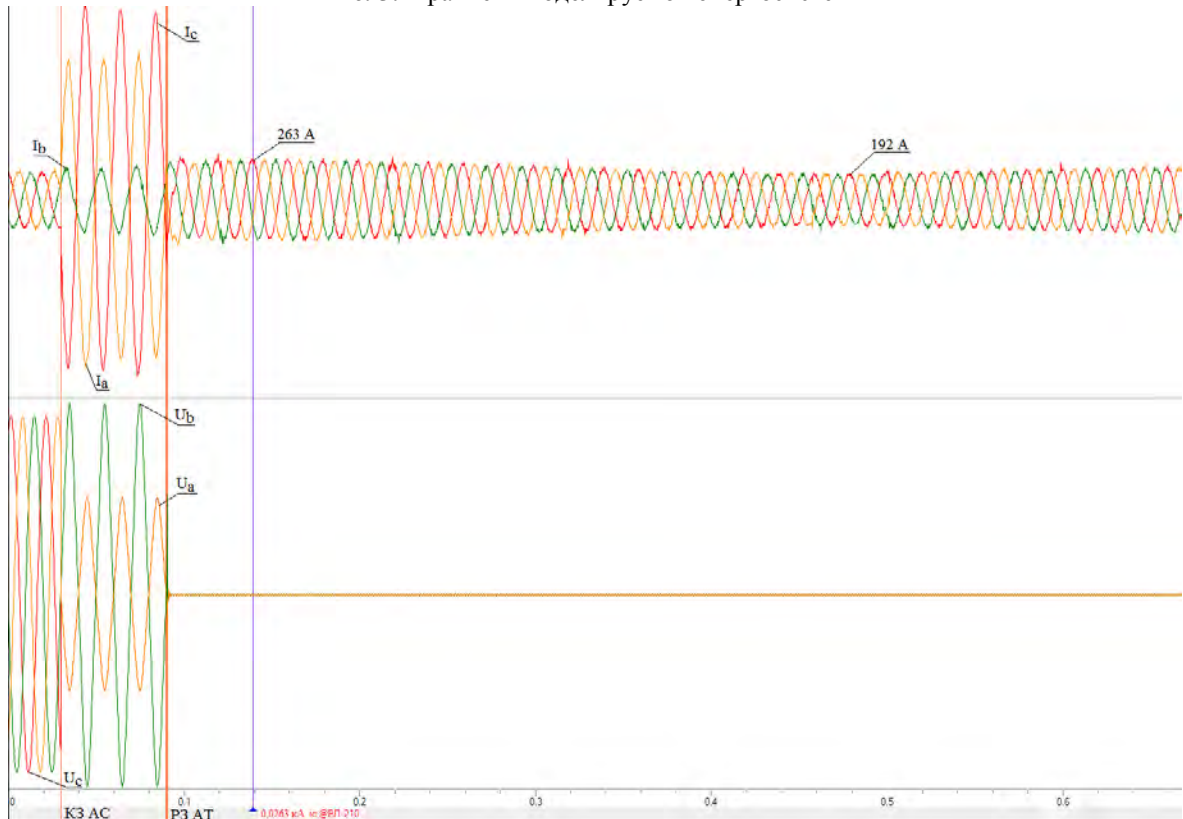


Рис. 6: Осциллограммы токов линии ВЛ-210 и напряжений на выводах ВН автотрансформатора АТ-5 при логическом учете функционирования РЗ АТ-5

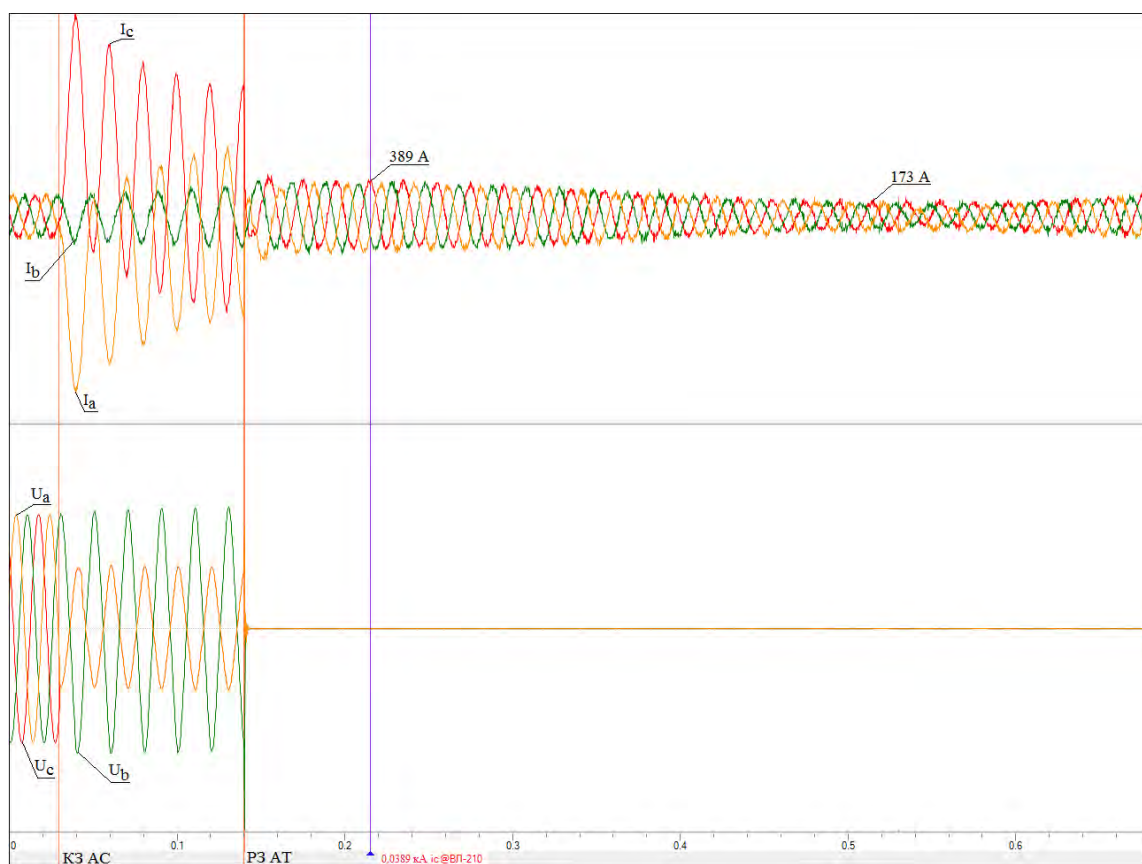


Рис. 7: Осциллограммы токов линии ВЛ-210 и напряжений на выводах ВН автотрансформатора АТ-5 при детальном моделировании функционирования РЗ АТ-5

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований, кратко обозначенные в данной статье, позволили сделать вывод о том, что характер протекания переходных процессов в значительной степени зависит от функционирования РЗ. При этом при использовании детализированных моделей защит и их упрощенных аналогов, реализующих лишь функцию сравнения контролируемых величин с уставкой и управление коммутационной аппаратурой, протекание переходного процесса было различным.

Вышесказанное позволяет подтвердить тот факт, что при моделировании режимов и процессов в ЭЭС необходимо учитывать должным образом все влияющие на них в значительной степени элементы, к которым в частности относится и релейная защита ЭЭС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений: Пер. с англ. / Под ред. А.Д. Горбунова. -М.: Мир, 1979. - 312с.
- [2] Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем//Известия Вузов. Проблемы энергетики, 2008, - № 9-10/1. – с. 164-170.
- [3] Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств всережимного моделирования в реальном времени энергосистем // Электричество, 2012. – №. 6 – С. 10-13.
- [4] Боровиков Ю.С. Моделирование всережимного функционирования в реальном времени интеллектуального района энергосистемы // Электричество. - 2013. - № 2. - С. 60-63
- [5] М.В. Андреев, Ю.С. Боровиков. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических

моделей // Современные проблемы науки и образования, 2013. – №3 [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.science-education.ru/109-9343>, свободный, 11.06.2013.

- [6] Н.Ю. Рубан, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев. Анализ неправильных действий дифференциально-фазной защиты линий электропередачи с помощью средств ее всережимного моделирования // Сборник докладов конференции "Релейная защита и противоаварийная автоматика. Перспективы развития", г. Кемерово, 11 сентября - 12 сентября 2014 г., с. 56-61.
- [7] Дж. Абрахамс, Дж. Каверли. Анализ электрических цепей методом графов. М., «Мир», 1967.



С.3-4. Аппроксимация фазо-модального преобразования многопроводных линий в задаче волнового определения места повреждения

С.Ю. ТОКАРЕВ
РАДИУС Автоматика
Россия
tokarev@rza.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Многопроводная линия, волновой процесс, волновые каналы, фазо-модальное преобразование, обусловленность матрицы, модальная декомпозиция, телеграфные уравнения, частотная зависимость, ВОМП.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Волновое определение места повреждения (ВОМП) на многопроводной линии базируется на явлении конечной скорости протекания волновых процессов. Источником волнового процесса выступает место повреждения на линии. Процесс распространения волн описывается телеграфными уравнениями. Решение этих уравнений может быть получено как в фазной координатной системе, так и модальной. Фазную систему координат используют для задачи синтеза, модальную – для задачи анализа.

Модальная система координат оперирует волновыми каналами. Например, трехфазная линия имеет три волновых канала (два «воздушных» и один «земляной»). Параметры «воздушных» каналов практически идентичны друг другу, и сильно отличаются от земляного канала. Такое различие позволяет, при определенных условиях, решать задачу одностороннего ВОМП, однако требует достаточно сложных вычислений. Двухстороннее ВОМП реализуется лишь с использованием «воздушных» каналов. Сложных вычислений в этом случае не требуется, необходимо лишь обеспечить точную синхронизацию времени.

Устройство ВОМП получает информацию в фазной системе координат от измерительных трансформаторов. Необходимо осуществлять преобразование из фазной системы координат в модальную. Такое преобразование называется фазо-модальным.

Фазо-модальное преобразование, в общем случае, индивидуально для конкретной многопроводной линии. Оно должно быть определено для каждой частотной составляющей волнового процесса. Волновые (переходные) процессы, по своей природе, кратковременны [1]. Причем, чем короче такой процесс, тем шире его спектр [2, стр.33]. В общем случае, он может содержать частотные составляющие от нескольких кГц до нескольких МГц [3]. Таким образом, необходимо брать в рассмотрение значительный диапазон частот.

Сигнал (функция времени) в модальной системе получают линейной сверткой с импульсной характеристикой (функции времени) фазо-модального преобразования. Импульсную характеристику фазо-модального преобразования получают из Фурье-образа (функции частоты) фазо-модального преобразования.

Операция линейной свертки волнового процесса требует значительных вычислительных ресурсов. Линейную свертку можно заменить круговой сверткой. Круговую

свертку можно реализовать через БПФ. Это может быть эффективно реализовано с помощью на сигнальных (DSP) процессорах. В режиме реального времени можно применять блоковую фильтрацию [2, стр.308-311].

Так или иначе, требуется осуществить достаточно громоздкие вычисления. Однако путем нивелирования частотной зависимости и использованием константного действительного (с нулевой мнимой частью) преобразования этого можно избежать. Операция свертки в этом случае может быть осуществлена тривиально.

Выбор формы фазо-модального преобразования определяет конечный результат. Аппроксимация – отбрасывание малозначущей информации. В задаче ВОМП значущей является информация о положении фронта волны в волновых каналах. Если такая информация не теряется при аппроксимации, то аппроксимация является допустимой.

Данная работа посвящена исследованию допустимости обозначенного вида аппроксимации фазо-модального преобразования для применения в задаче ВОМП.

2 ФАЗО-МОДАЛЬНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ

Модальная декомпозиция по напряжению осуществляется путем отыскания матрицы собственных векторов по напряжению T_V и матрицы собственных чисел γ^2 из произведения матриц продольного сопротивления Z и поперечной проводимости Y . Обращение матрицы собственных векторов по напряжению позволяет получить фазо-модальное преобразование T_V^{-1} .

Фазо-модальное преобразование по току можно получить из фазо-модального преобразования по напряжению с помощью выражения (1). Из преобразования по току можно получить преобразование по напряжению таким же образом.

$$T_I = T_V^{-T} \quad (1)$$

В данной работе для осуществления модальной декомпозиции задействуется функция «eig» программного комплекса MATLAB [4].

3 КЛАССИФИКАЦИЯ ЛИНИЙ

Линии, имеющие какую-либо ось симметрии, условимся называть симметричными. Линии без таковой – несимметричными линиями. Примером симметричной линии является линия с горизонтальным расположением проводников [5, рис.2]. Она имеет вертикальную ось симметрии. Эта ось проходит через центральную фазу.

Фазо-модальное преобразование симметричных линий является константным (не меняется с частотой) действительным (без мнимой части) преобразованием. Оно одинаково для тока и напряжения. Такие преобразования для трехпроводных линий хорошо изучены и могут быть найдены, например, в [6]. Преобразование несимметричных линий является частным случаем. По этой причине оно практически не исследовалось. В настоящей работе акцент делается именно на этот тип линий.

4 ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ

Эксперименты с несимметричными линиями показали, что получить пригодное фазо-модальное преобразование во всей частотной области не всегда представляется возможным. Могут существовать участки спектра, где обращение T_V численно неустойчиво. Причиной тому является плохая (значительно больше единицы) обусловленность T_V на этих частотах.

Так, например, линия, представленная в [5, рис.3], имеет диапазон с плохой обусловленностью в районе частоты 1.8 кГц (рис. 1). Плохая обусловленность в этом диапазоне объясняется наличием практически кратных собственных чисел «воздушных» каналов. Соответствующие им собственные вектора получаются фактически линейно-зависимыми. Определитель T_V принимает близкое к нулю значение, т.е. матрица становится почти вырожденной.

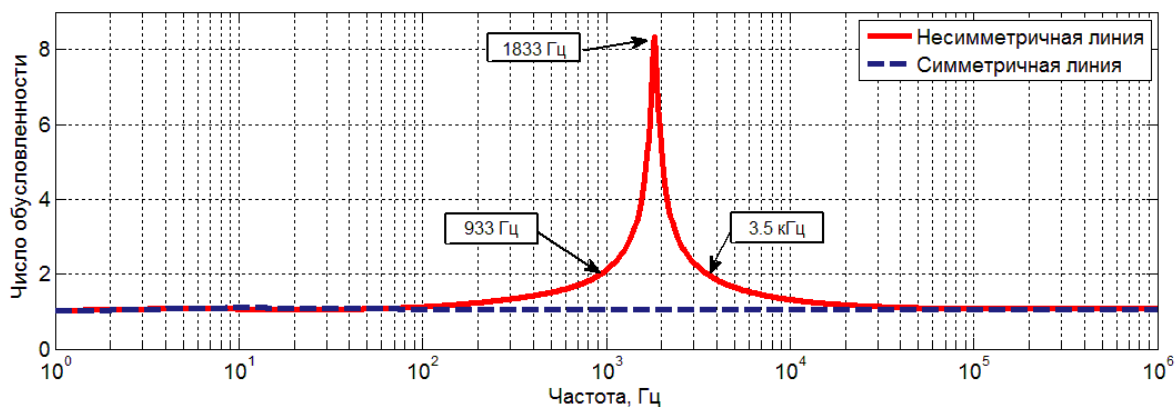


Рис. 1 – Число обусловленности матрицы собственных векторов несимметричной линии

Годограф постоянных распространения γ волновых каналов несимметричной линии представлен на рис.2. Постоянные распространения полностью качественно повторяют поведение соответствующих собственных чисел, но визуально более наглядны. Выделенный участок годографа соответствует диапазону частот, где число обусловленности более двух (рис.1).

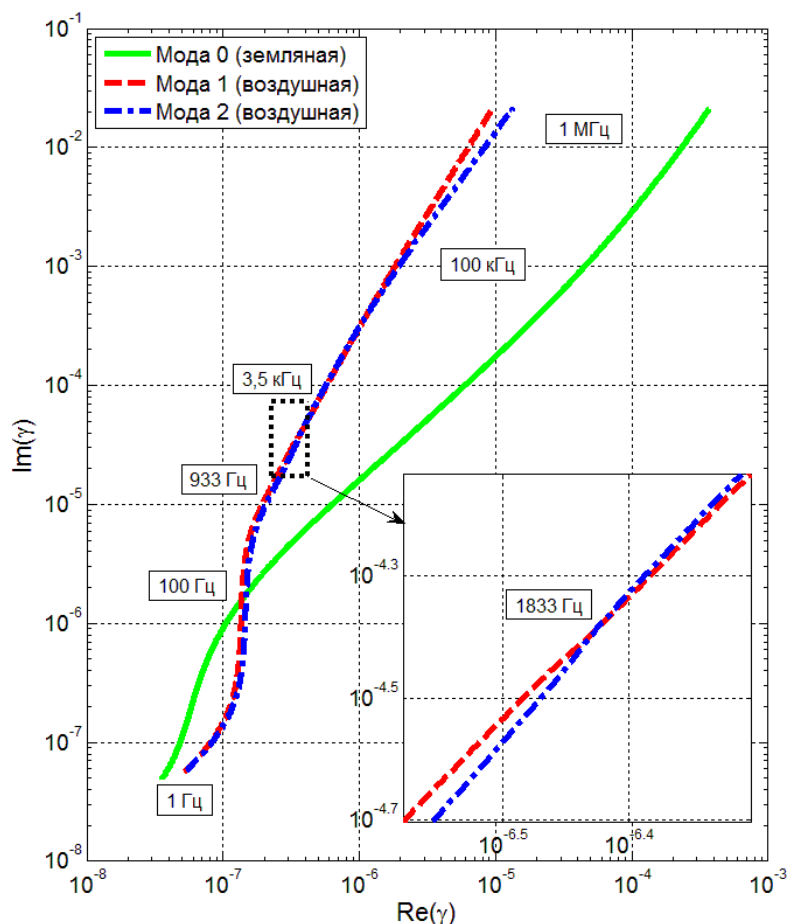


Рис. 2 – Годограф постоянных распространения несимметричной линии

Фазо-модальное преобразование несимметричной линии представлено на рис.3. В районе частот с плохой обусловленностью (рис.1) как действительная, так и мнимая части преобразования меняют там свое поведение. Можно говорить, что в данный район делит всю частотную область на две части. В каждой такой части преобразование практически не меняется с частотой.

Можно выбрать какую-либо частотную составляющую и использовать её для преобразования сигнала из фазной координатной системы в модальную. При этом использовать

только действительную часть преобразования. Это позволяет осуществлять операцию свёртки тривиально.

Обратим внимание на экстремум (рис.3) в районе частоты 1.8 кГц. Он имеет природу не физическую, но математическую. Этим частотам соответствует наибольшее значение числа обусловленности - восемь (рис. 1). Ошибка обращения матрицы T_V достигает здесь наибольшей погрешности. Здесь мы имеем так называемую математически «некорректную задачу». Решение некорректных задач получают, например, с помощью регуляризации по Тихонову, либо же применением метода малых возмущений. Регуляризация применяется к T_V во время осуществления обращения. Малые возмущения вносятся в исходные параметры линии Z и/или Y.

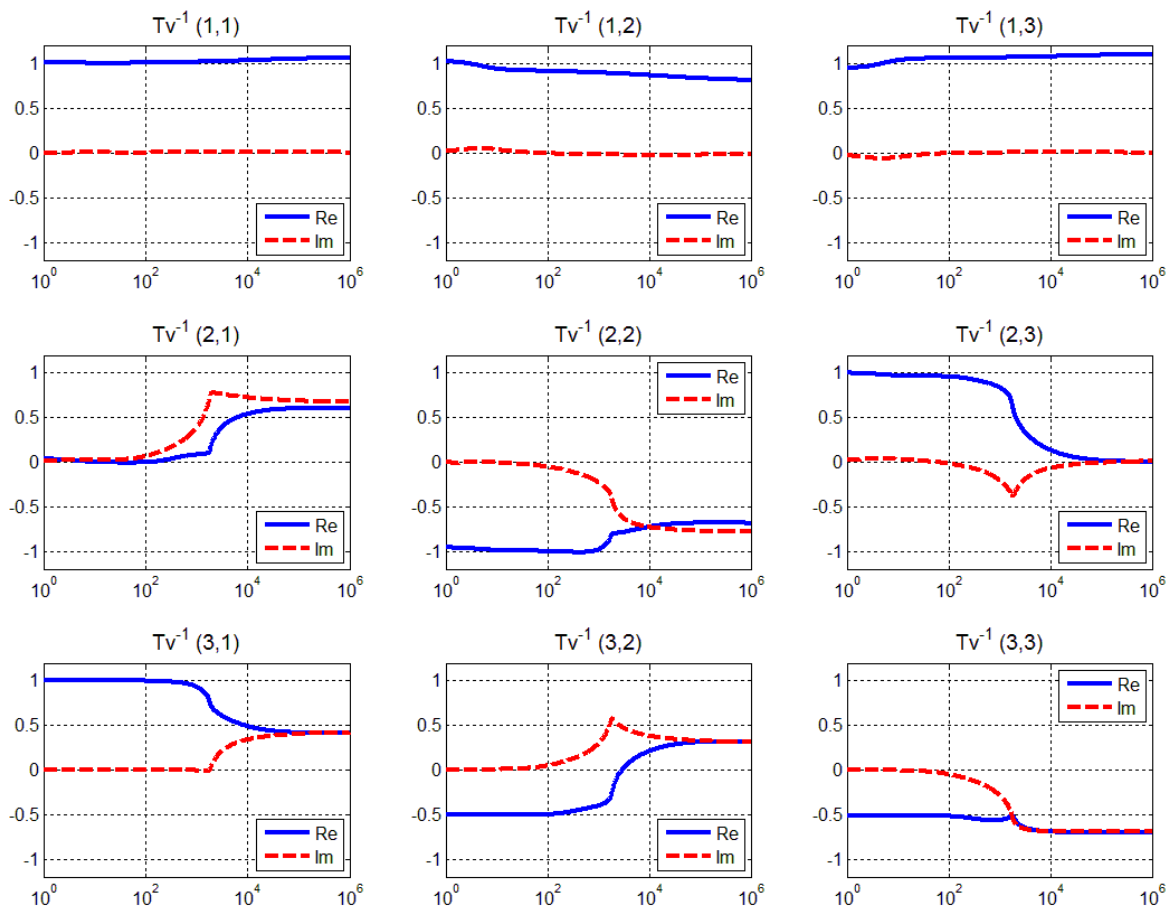


Рис. 3 – Фазо-модальное преобразование несимметричной линии (функция частоты)

5 АППРОКСИМАЦИЯ

Продemonстрируем процесс распространения волн по несимметричной линии [5, рис.3]. Введем некоторые допущения. Они не окажут влияние на ВОМП, но позволят продемонстрировать распространение волн без лишних усложнений. Будем считать, что на шинах отсутствует отражение волнового сигнала (согласованная нагрузка). Интерес представляет фронт волны, а не её форма. Не будем брать в рассмотрение установившийся режим (сигнал промышленной частоты). Такой сигнал при необходимости может быть отфильтрован. В качестве волнового сигнала примем прямоугольный импульс амплитудой 1 В и длительностью 400 мкс в фазе №1. Это соответствует условному КЗ на землю в этой фазе. Пусть сигнал распространяется из точки, удаленной на 200 км от места регистрации (рис. 4).

Продemonстрируем результат наличия плохой обусловленности при обращении T_V во временной области. Пиковые значения (рис.5) в «воздушных» каналах в начале и конце импульса соответствуют частотам, где в матрице фазо-модального преобразования число обусловленности велико (рис. 1). «Земляной» канал (рис.2) не имеет кратных γ^2 . Он получен математически точно. Первая строка матрицы фазо-модального преобразования (рис.3)

соответствует «земляному» каналу. Можно наблюдать, отсутствие какого-либо специфического поведения преобразования этого канала в диапазоне частот с плохой обусловленностью (рис. 1).

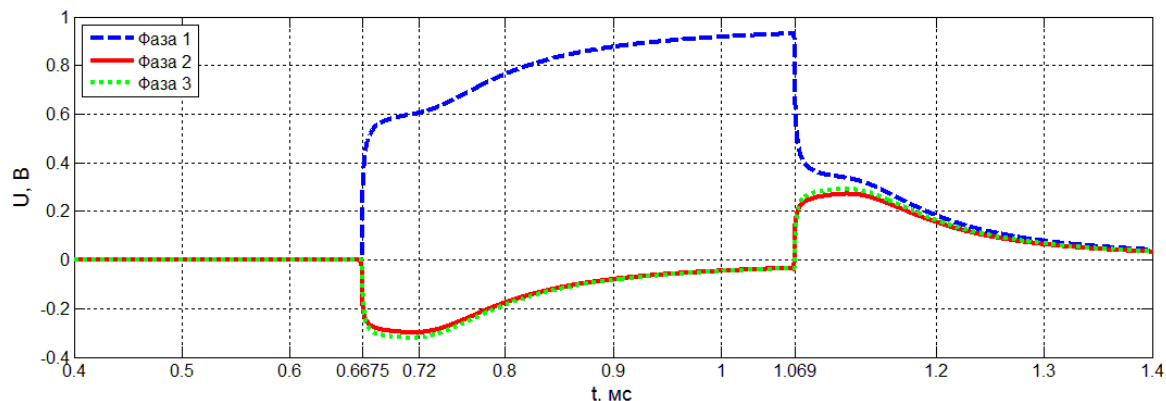


Рис. 4 – Сигнал в фазной системе координат (несимметричная линия)

Обратим внимание, что «земляной» канал пересекает (рис.2) «воздушные» каналы в районе частоты 100 Гц. В точной математической трактовке это свидетельствует о наличии кратных γ^2 . При этом влияния плохой обусловленности, в отличие от «воздушных» каналов, «земляной» канал не претерпевает. Факт пересечения волновых каналов между собой еще не свидетельствует о наличии плохой обусловленности. Плохая обусловленность появляется там, где каналы находятся достаточной близости друг от друга на протяжении значительного диапазона частот.

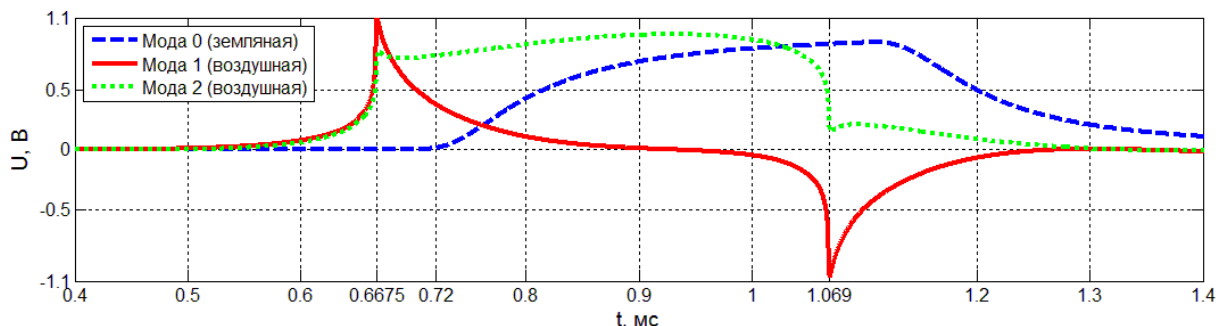


Рис. 5 – Сигнал в модальной системе координат (несимметричная линия) с использованием полученного фазо-модального преобразования

Полученный результат (рис.5) не пригоден для ВОМП в виду наличия составляющих волнового сигнала $\{0.6000-0,6675 \text{ мс}\}$ в той области, куда волна не успела еще распространиться.

Теперь применим к рассматриваемому фазному сигналу (рис. 4) аппроксимацию фазо-модального преобразования следующими константными значениями:

$$T_V^{-1}(50 \text{ Гц}) = \begin{pmatrix} 1.0115 & 0.9250 & 1.0635 \\ -0.0067 & -0.9978 & 0.9631 \\ 1.0000 & -0.5037 & -0.5160 \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} 0.0058 & 0.0041 & -0.0099 \\ 0.0352 & -0.0320 & 0.0031 \\ -0.0034 & 0.0236 & -0.0238 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$T_V^{-1}(1.8 \text{ кГц}) = \begin{pmatrix} 1.0276 & 0.8967 & 1.0575 \\ 0.1355 & -0.8082 & 0.6274 \\ 0.7537 & -0.2635 & -0.5147 \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} 0.0101 & -0.0171 & 0.0070 \\ 0.7397 & -0.3961 & -0.3794 \\ 0.0021 & 0.5681 & -0.5384 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$T_V^{-1}(10 \text{ кГц}) = \begin{pmatrix} 1.0403 & 0.8743 & 1.0854 \\ 0.5390 & -0.7261 & 0.1408 \\ 0.4934 & 0.2110 & -0.6939 \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} 0.0123 & -0.0216 & 0.0093 \\ 0.7268 & 0.7308 & -0.0680 \\ 0.3399 & 0.3837 & -0.6901 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T_V^{-1}(500 \text{ кГц}) = \begin{pmatrix} 1.0687 & 0.8242 & 1.1070 \\ 0.6828 & -0.6822 & 0.0048 \\ 0.4143 & 0.3197 & -0.7002 \end{pmatrix} + j \cdot \begin{pmatrix} 0.0072 & -0.0126 & 0.0054 \\ 0.6783 & -0.7854 & 0.0057 \\ 0.4174 & -0.3139 & -0.6929 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Воспользуемся лишь действительной частью выражений (2)-(5). Результат применения этих преобразований во временной области показан на рис.6-9.

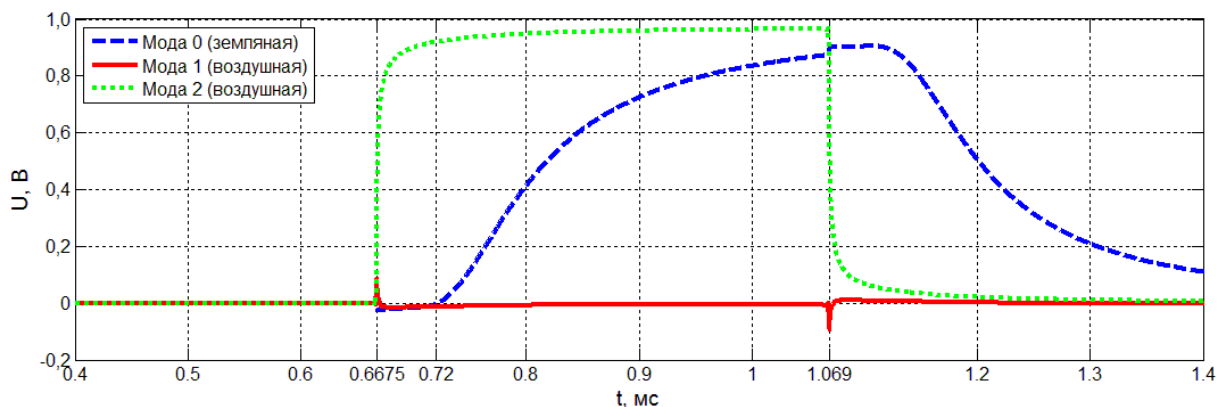


Рис. 6 – Сигнал в модальной системе координат (несимметричная линия) с использованием константного действительного преобразования на частоте 50 Гц

На рис.6 один из воздушных каналов, «Мода 1», при использовании преобразования (2) практически не несет в себе энергию сигнала. Весь «воздушный» сигнал распространяется лишь в канале «Мода 2». Таким образом, в данном случае при определении волнового фронта нельзя опираться на канал «Мода 1». Нужно использовать канал «Мода 2». Причиной отсутствия сигнала в канале «Мода 1» является то, что практически вся энергия сигнала в фазной области приложена к фазе №1 [5, рис.3]. Выражение (2) имеет несопоставимо малый множитель (строка 2, столбец 1) для формирования сигнала в канале «Мода 1» из сигнала фазы №1. Однако, если значительная часть энергии сигнала в фазной системе координат была бы приложена к фазе №2 или фазе №3, то сигнал в модальной системе координат имелся бы в обоих «воздушных» каналах.

Рассмотренный случай показывает, что устройство ВОМП должно использовать все «воздушные» каналы, ибо заранее неизвестно в какой фазе энергии волнового процесса будет достаточной величины.

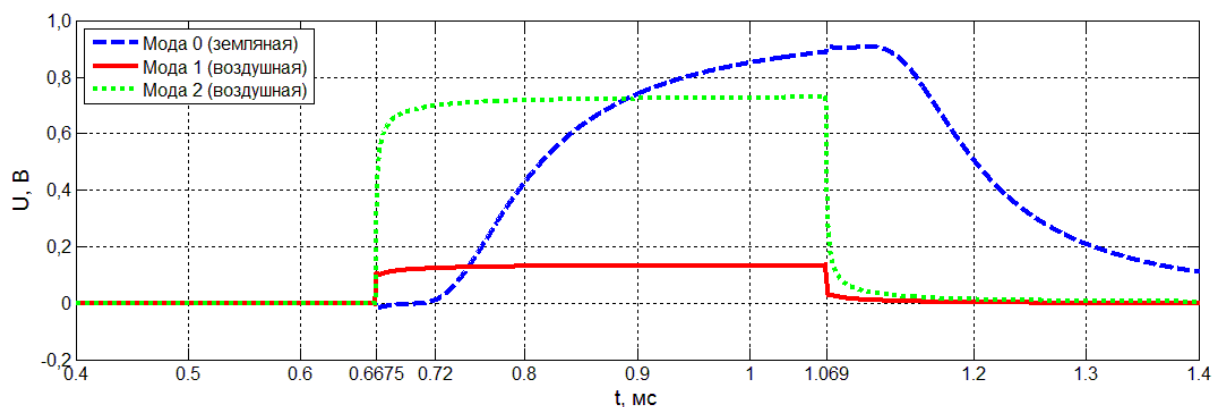


Рис. 7 – Сигнал в модальной системе координат (несимметричная линия) с использованием константного действительного преобразования на частоте 1,8 кГц

Аппроксимации (3) соответствует частоте, на которой имеется максимальное значение числа обусловленности (рис.1). При этом она не имеет принципиальных отличий от аппроксимаций (3)-(5). Различия между всеми приведенными аппроксимациями кроются лишь в соотношении долей энергии сигнала в воздушных каналах.

Во всех случаях применения аппроксимации метка времени фронта волны в «воздушных» каналах {0,6675 мс} определяется адекватно. Это соответствует истинному месту формирования волны в «воздушных» каналах. Проблема плохой обусловленности здесь влияние не оказывает.

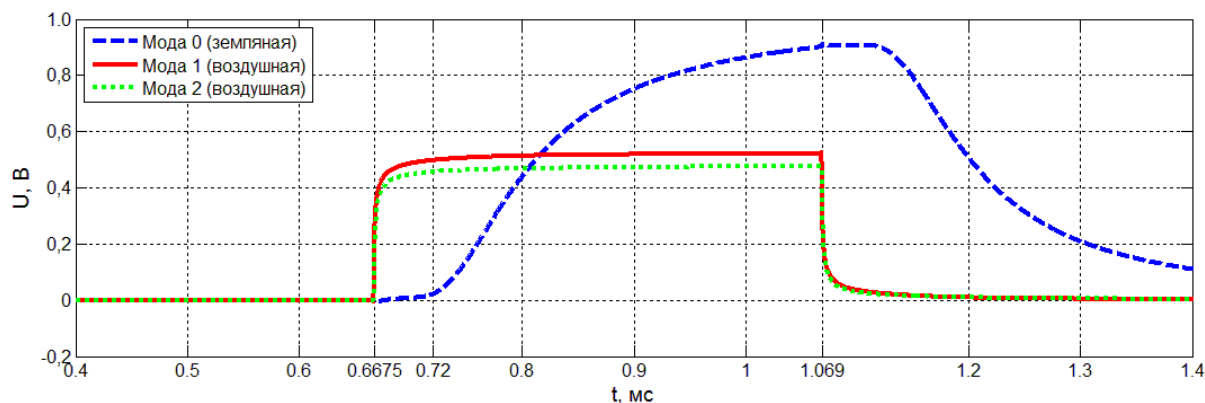


Рис. 8 – Сигнал в модальной системе координат (несимметричная линия) с использованием константного действительного преобразования на частоте 10 кГц

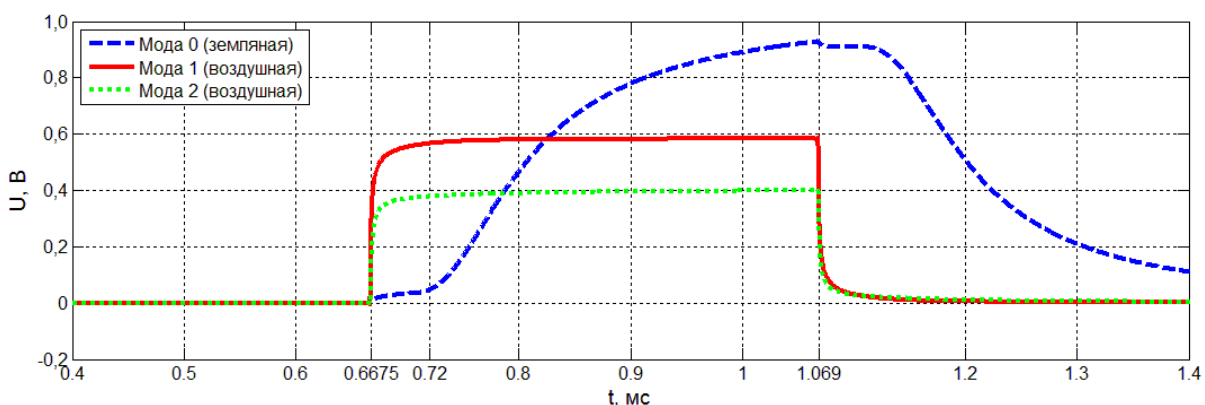


Рис. 9 – Сигнал в модальной системе координат (несимметричная линия) с использованием константного действительного преобразования на частоте 500 кГц

В заключении продемонстрируем сигнал в модальной системе координат с точным учетом частотной зависимости фазо-модального преобразования на примере симметричной линии (рис.10). Параметры сигнала аналогичны сигналу, представленному на рис.4. Сигнал посылается в фазу №1 [5, рис.2].

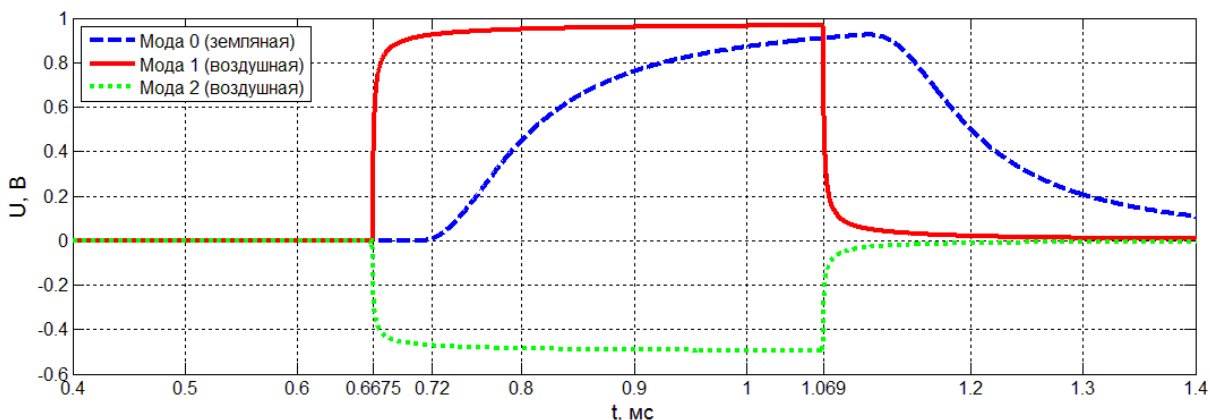


Рис. 10 – Сигнал в модальной системе координат (симметричная линия)

Положение фронта «воздушных» каналов и его форма идентичны результату применения аппроксимаций (2)–(5). «Земляной» канал аналогичен результату аппроксимации везде кроме двух мест. Первое такое место является точкой, где сигнал «воздушных» каналов имеет пересечение {1.069 мс} с сигналом «земляного» канала. Второе место – участок {0.6675-0.7200 мс} от начала появления «воздушного» сигнала до фактического появления «земляного» сигнала. Эти особенности возникают только в случае использования аппроксимации

«земляного» канала (рис.6-9). Они могут оказать влияние при решении задачи одностороннего ВОМП путем использования вейвлетного преобразования.

6 ВЫВОДЫ

Фазо-модальное преобразование многопроводных линий может быть аппроксимировано действительной константой. Эта константа может быть определена даже на участке спектра, где имеется плохая обусловленность. Предложенный вид аппроксимации не вносит значимую погрешность в определение метки фронта волны в «воздушных» каналах, но позволяет осуществлять операцию свертки тривиально. Сигнал в «земляном» канале имеет некоторую восприимчивость к факту использования аппроксимации, что может оказать влияние при определении истинного положения фронта. В этом случае, возможно, потребуется использовать точное преобразование, даже если оно имеет плохую обусловленность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Watson N., Arrillaga J., Power Systems Electromagnetic Transients Simulation, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2007, fig 1-1.
2. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.; ил. – (Учебная литература для вузов)
3. Pathirana V., Dirks. and McLaren P. G., Hardware and software implementation of a travelling wave based protection relay, Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, vol. 1, p. 701, 2005.
4. MATLAB R2012a, The MathWorks.
5. Токарев С.Ю. Фазо-модальное преобразование многопроводных линий // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 2. – С. 25–30.
6. Saha M.M., Izykowski J. and Rosolowski E., Fault Location on Power Networks, Springer, London, 2010, p.53.



С.3-5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В РЕЖИМАХ С ГЛУБОКИМ НАСЫЩЕНИЕМ МАГНИТОПРОВОДОВ

С.Л. КУЖЕКОВ, А. А. ДЕГТЯРЁВ, P. FORSYTH, С. PETERS,

J. ZAKONJSEK, М.А. ШАМИС, Ф. А. ИВАНОВ

ООО НПФ «Квazar», RTDS Technologies Ltd, ЭнЛаб

Россия, Канада, Словения

stanislavkuzhekov@yandex.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА, ПЕРЕХОДНЫЙ ПРОЦЕСС, ГРУППА, ТРАНСФОРМАТОР ТОКА, НАСЫЩЕНИЕ, СЕРДЕЧНИК, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРОГРАММА, RTDS

ВВЕДЕНИЕ

Трансформаторы тока с замкнутыми сердечниками, изготовленными из электротехнической стали (ТТ), по существу по [1] относящиеся к классу ТРХ, в настоящее время являются одними из основных датчиков информации для вторичных систем электроэнергетики, в частности, релейной защиты и автоматики. Релейная защита и автоматика (РЗА) электроэнергетических систем (ЭЭС) должны правильно функционировать при максимально возможных токах короткого замыкания (КЗ). По этой причине нагрузка на ТТ выбирается по условию 10%-ной или 5%-ной погрешности. Однако в переходных режимах КЗ с наличием значительной апериодической составляющей в первичном токе и остаточной магнитной индукции в сердечниках ТТ, совпадающей по знаку с направлением перемагничивания, обусловленного вышеуказанной составляющей, погрешности ТТ могут существенно превышать 10%. В частности, в стандартах США [2] и Великобритании [3] нормировано минимальное время насыщения ТТ в переходном режиме, равное 2 мс.

На современном уровне развития науки и техники основным методом исследования переходных процессов в ТТ является математическое моделирование и испытания устройств РЗА с помощью программно-аппаратных средств, моделирующих процессы в реальном времени, в частности, RTDS simulator.

Математическое моделирование процессов в трансформаторах тока затрудняется следующими обстоятельствами: неоднозначность и нелинейность характеристики намагничивания; наличие остаточной магнитной индукции в сердечниках.

Всё многообразие работ по моделированию процессов перемагничивания ферромагнитных материалов можно разделить на две группы:

- учитывающие перемагничивание по частным петлям (циклам) гистерезиса;
- использующие в расчетах однозначные характеристики намагничивания.

В программных комплексах при моделировании процессов в ТТ часто используется модель гистерезиса Jiles D.C., Atherton D.L. [4]. Достоинство указанной модели заключается в возможности реализации частных циклов перемагничивания, что важно для процессов, при которых магнитная индукция не выходит за предельную петлю гистерезиса. Однако расчеты процессов в ТТ с учетом частных циклов гистерезиса весьма трудоемки и могут вызвать затруднения при моделировании процессов во вторичных цепях ТТ в режиме реального времени. Другим недостатком моделей ТТ, используемых в моделирующих комплексах, является учет взаимного влияния ТТ при работе их в группах.

В [5] предложено усовершенствование модели трансформатора тока (ТТ), основанной на модифицированной теории гистерезиса Jiles D.C., Atherton D.L. Основным ее достоинством является возможность соединения нескольких моделей ТТ друг с другом, а также с моделями других устройств, например, контрольных кабелей и реле. Автор [5] сообщает о неудовлетворительной скорости моделирования больших схем с десятками ТТ. Однако моделирование таких схем необходимо при анализе поведения устройств защиты сборных шин с большим числом присоединений.

В условиях насыщения сердечников ТТ, как показали исследования, проведенные в Новочеркасском политехническом институте профессором А. Д. Дроздовым [6] и его учениками С.Д. Хлебниковым и Э.В. Подгорным [7], допустимо не учитывать частные циклы перемагничивания сердечников ТТ и использовать однозначную характеристику намагничивания. Указанное допущение дает потенциальную возможность производить в реальном времени расчеты процессов в ТТ с учетом их взаимного влияния при соединении в группы.

1 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Целью исследования являлась разработка библиотеки программ расчета процессов в одиночном ТТ и их группах со схемами соединения: звезда, неполная звезда, треугольник, последовательное и параллельное соединения ТТ, схемы на разность (сумму) токов, дифференциальных схем (однофазной и трехфазной). К элементам библиотеки предъявлялось требование обеспечения потенциальной возможности проведения расчетов процессов в ТТ и их группах в реальном времени с максимальным шагом расчета 50 мкс.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выбрать и обосновать расчетные характеристики намагничивания ТТ;
- предложить критерии применимости в расчетах однозначных характеристик намагничивания ТТ;
- разработать математические модели ТТ и их групп;
- разработать дискретные математические модели ТТ и их групп;
- выбрать целесообразный численный метод расчета вторичных токов моделей ТТ;
- разработать компьютерные программы расчета процессов в ТТ и их группах и дать их описание;
- оценить погрешность, обусловленную неучетом неоднозначности характеристики намагничивания.

Моделирование и расчеты переходных и установившихся режимов работы ТТ произведено при следующих допущениях:

- сложная картина магнитного поля заменена суммой трех магнитных потоков: Φ_0 – основной магнитный поток (взаимной индукции), $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ – потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток, соответственно (рис. 1, а);
- потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$, пропорциональны первичному i_1 и вторичному i_2 токам, соответственно, и, следовательно, постоянны индуктивности рассеяния первичной $L_{\sigma 1}$ вторичной $L_{\sigma 2}$ обмоток;
- активные сопротивления потерь на гистерезис и вихревые токи или не учитываются.

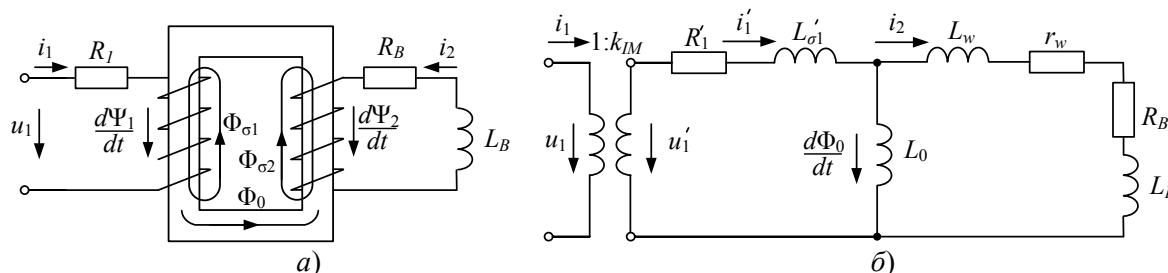


Рис. 1: Трансформатор тока (а) и его схема замещения (б)

С учетом указанных допущений поведение одиночного одноступенчатого ТТ описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} u_1' &= R_1' i_1' + L_{\sigma 1}' \frac{di_1'}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_0}{dt}; \\ w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt}; \\ i_1' - i_2 &= i_0; \\ B &= f(H); \end{aligned} \quad (1)$$

где, в соответствии со схемой замещения ТТ, представленной на рис. 1 б,

u_1' , i_1' – приведенные ко вторичной цепи ТТ напряжение на зажимах первичной обмотки и первичный ток;

i_2 – ток во вторичной цепи;

i_0 – намагничивающий ток;

R_1' – приведенное ко вторичной цепи ТТ активное сопротивление первичной обмотки;

$R_2 = r_w + R_B$ – суммарное активное сопротивление вторичной обмотки (r_w) и нагрузки на ТТ (R_B);

$L_2 = L_{\sigma 2} + L_B$ – суммарная индуктивность рассеяния вторичной обмотки ($L_{\sigma 2}$) и нагрузки на ТТ (L_B);

$L_{\sigma 1}'$ – приведенная ко вторичной цепи ТТ индуктивность рассеяния первичной обмотки;

$L_{\sigma 2}$ – индуктивность рассеяния вторичной обмотки;

w_2 – число витков вторичной обмотки;

Φ_0 – основной магнитный поток в сердечнике ТТ;

$B = \frac{\Phi_0}{w_2 S}$, $H = \frac{i_0 w_2}{l}$ – магнитная индукция и напряженность магнитного поля в сердечнике, соответственно;

S , l – поперечное сечение сердечника и средняя длина магнитной силовой линии, соответственно.

Так как первичная обмотка ТТ подключена к источнику тока, то для схемы замещения справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{02}}{dt} &= R_2 i_2 + L_{\sigma 2} \frac{di_2}{dt}; \\ i_1' - i_2 &= i_0; \\ B &= f(H); \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Psi_{02} = w_2 \Phi_0$ – потокосцепление вторичной обмотки, обусловленное основным магнитным потоком.

На базе (2) были получены системы дифференциальных уравнений для всех указанных выше групп соединения ТТ. По полученным выражениям разработаны интегральные формы математических моделей трансформаторов тока и их групп и соответствующие им дискретные модели, аналогичные описанным в [8,9]. Расчеты проводились с использованием итерационного метода спуска [9].

Критерии применимости в расчетах однозначных характеристик намагничивания ТТ

Известен ряд методов аппроксимации однозначных характеристик намагничивания, которые можно разделить на следующие группы:

– простейшие виды кусочно-линейной аппроксимации кривой намагничивания: идеальная прямоугольная кривая (ПХН) и спрямленная в насыщенной части характеристика (СХН);

– ломаная линия с числом отрезков прямых линий от трех до семи на квадрант координатной плоскости (В; Н);

– замена характеристики намагничивания в насыщенной части сплайнами и кусочно-полиномиальной функцией [8].

Анализ указанных методов был выполнен в [10].

Поведение ТТ с ПХН определяется параметром A_Z [11]:

$$A_Z = \Psi_s / \Psi_m,$$

где Ψ_s – потокосцепление насыщения; Ψ_m – амплитуда потокосцепления вторичной обмотки ТТ, которая имела бы место при отсутствии насыщения.

У ТТ с СХН поведение ТТ дополнительно определяется параметром Θ [12]

$$\Theta = z_2 / x_{0s},$$

где x_{0s} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания на участке насыщения.

Следует отметить, что характеристики ТТ с СХН при $\Theta \geq 20$ практически совпадают с характеристиками установившегося режима ТТ с ПХН. Методы ПХН и СХН – аппроксимации применимы для расчета процессов в ТТ в установившихся режимах, если $A_Z \leq 1$, и, как показали исследования, если $A_Z \leq 3$ в переходных режимах.

В [7] приведен критерий замены петли гистерезиса однозначной кривой, установленный с помощью экспериментов на физических и аналоговых моделях ТТ: если амплитудное значение напряженности магнитного поля в сердечнике $H_{MAX} < 100H_C$, где H_C – коэрцитивная сила, то допустимо заменить динамические петли гистерезиса однозначной кривой. При этом в диапазоне остаточных магнитных индукций $\pm B_{R.LIM}$ можно пренебречь током потерь в стали и намагничивающим током ТТ. Данное положение принято в качестве критерия применимости расчетной однозначной характеристики намагничивания ТТ.

Выбор однозначной характеристики намагничивания

Возможны следующие виды однозначных характеристик намагничивания:

– основная и начальная кривые намагничивания;

– средняя симметричная кривая намагничивания $B_{MAX}(H_{MAX})$, т. е. средняя линия внутри предельной петли гистерезиса (рис. 2, характеристика 3);

– амплитудная динамическая симметричная кривая намагничивания $B_{MAX}(H_{MAX})$;

– характеристика, которая на участке $\pm B_{R.LIM}$, где $\pm B_{R.LIM}$ – предельная остаточная индукция, совпадает с осью магнитных индукций, а далее переходит на амплитудную динамическую симметричную кривую намагничивания $B_{MAX}(H_{MAX})$;

– характеристика, которая на участке $\pm B_{R.LIM}$, где $\pm B_{R.LIM}$ – предельная остаточная индукция, совпадает с осью магнитных индукций, а далее идет по нисходящей ветви предельной петли гистерезиса (рис. 2, характеристика 4);

– идеальная прямоугольная кривая (ПХН) – (рис. 2, характеристика 1) и спрямленная в насыщенной части (СХН) – (рис. 2, характеристика 2).

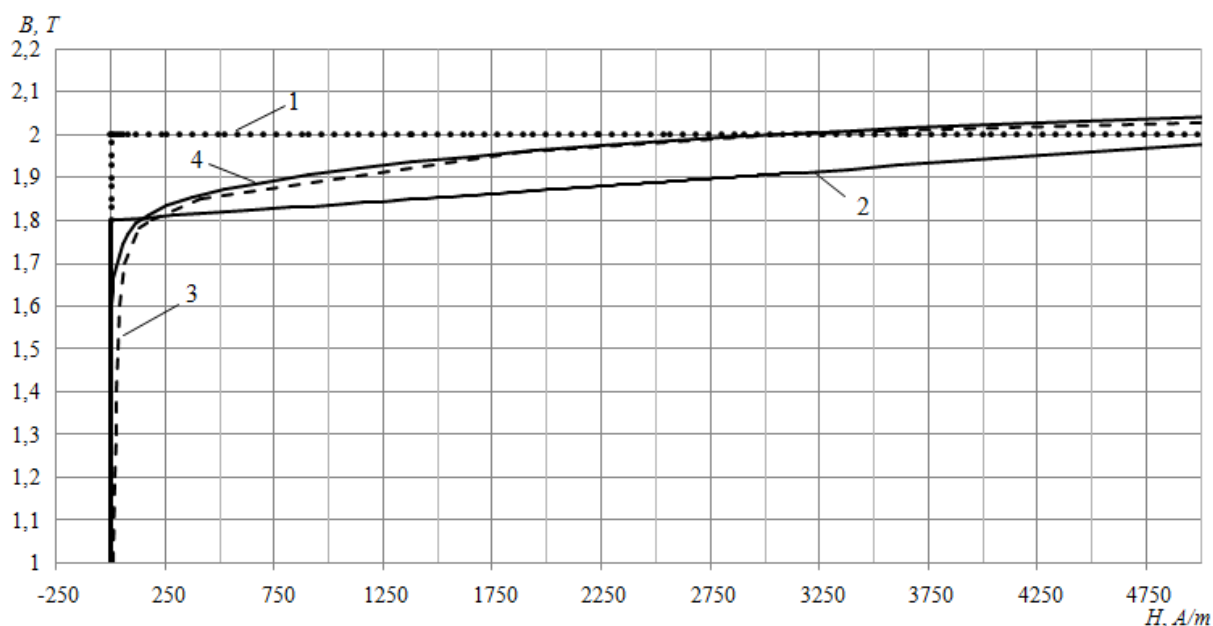


Рис.2: Однозначные характеристики намагничивания:
1 – прямоугольная (Rectangular MC); 2 – спрямленная (Rectification MC); 3 – средняя (Average MC); 4 – нисходящая ветвь предельной петли гистерезиса (Downward MC)

Очевидно, что использование основной и начальной характеристик намагничивания нецелесообразно, так как они не позволяют учитывать остаточную индукцию в сердечниках ТТ. Такой же недостаток имеют средняя и амплитудная динамическая характеристики.

Характеристика, которая на участке $\pm B_{R.LIM}$, где $B_{R.LIM}$ - предельная остаточная магнитная индукция, совпадает с осью магнитных индукций, а далее переходит на амплитудную динамическую симметричную кривую намагничивания не обладает таким недостатком. Однако имеет место неопределенность в переходе с одной части характеристики на другую.

Прямоугольная и спрямленная характеристики целесообразны при приближенных расчетах, позволяющих оценить качественный характер процессов.

С практической точки зрения наиболее целесообразно использовать в расчетах характеристики типа 1-2, 4. Характеристику 4 можно получить экспериментально на реальном ТТ по предельной петле гистерезиса.

С целью обоснования целесообразной однозначной характеристики намагничивания ТТ, работающего в условиях глубокого насыщения, были проведены расчеты переходного процесса в одиночном ТТ с учетом частных циклов перемагничивания по методу Jiles D.C., Atherton D.L. и с использованием перечисленных выше однозначных характеристик намагничивания. Результаты расчетов показали, что наиболее приемлемой по условию точности и скорости расчетов является характеристика 4, которая принята в качестве расчетной.

Так как нелинейный участок однозначной характеристика намагничивания ТТ $H = f(B)$ задается пользователем в дискретном виде (набором пар значений В-Н), то для получения промежуточных значений H использован алгоритм интерполяции сплайнами третьего порядка (кубический сплайн).

Оценка погрешности, обусловленной учетом неоднозначности характеристики намагничивания

На рисунках 3 и 4 для модели одиночного ТТ Jiles D.C., Atherton D.L и модели ТТ с нисходящей ветвью кривой намагничивания (Downward MC) приведены кривые следующих сигналов:

- i_{1p} – приведенный к вторичной цепи первичный ток трансформатора тока;
- i_2 – ток нагрузки;
- i_0 – намагничивающий ток;
- B – магнитная индукция;

– H – напряжённость магнитного поля.

Указанные кривые получены при пятнадцатикратном токе КЗ для ТТ типа ТФНД-110М, имеющего следующие параметры: $k_I = 600/5$ А; $P_{ном} = 30$ ВА; $\cos \varphi = 0,8$; $S = 0,00191$ м²; $l = 0,935$ м; $W_1 = 3$; $W_2 = 359$; $R_2 = 0,48$ Ом; $L_2 = 0,8$ мГн.

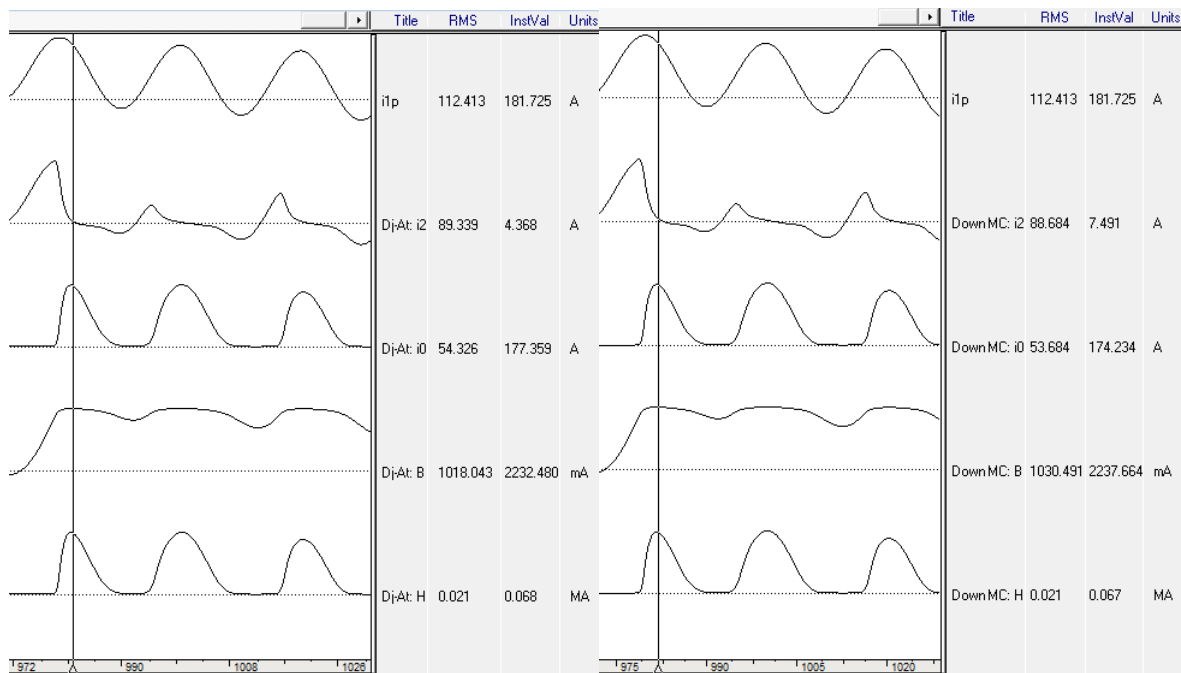


Рис. 3: Осциллограмма сигналов модели ТТ Jiles D.C., Atherton D.L

Рис.4: Осциллограмма сигналов модели ТТ с нисходящей ветвью кривой намагничивания

Для оценки погрешностей, обусловленных применением однозначных характеристик намагничивания, на рисунке 5 приведены кривые действующих значений первой гармоники вторичного тока различных моделей.

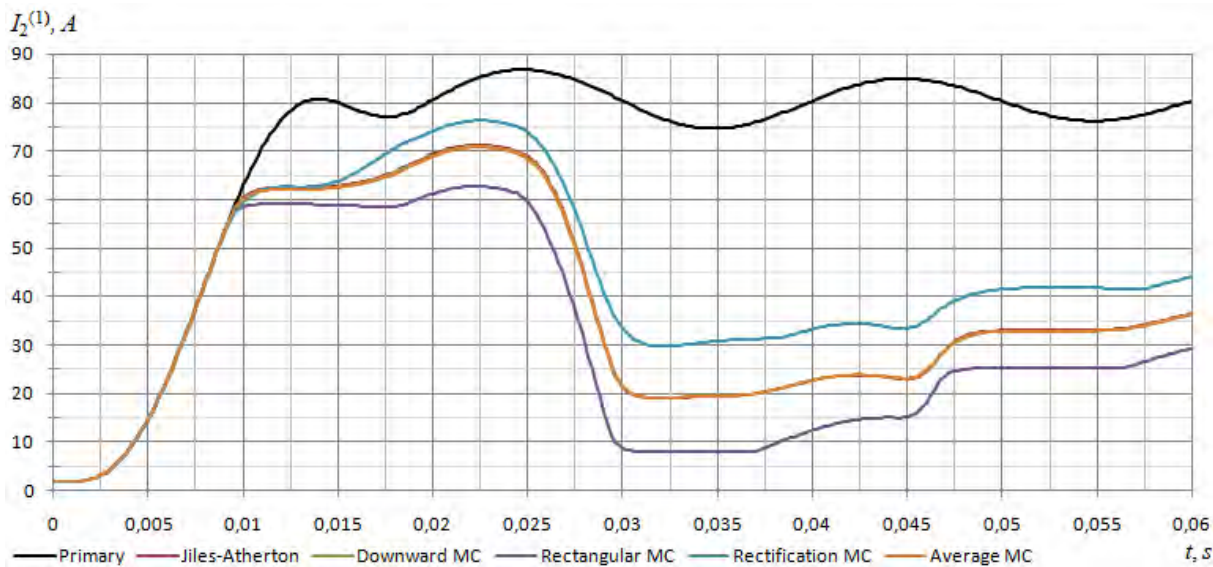


Рис. 5: Кривые действующих значений первых гармоник вторичных токов для пятнадцатикратного тока КЗ

Расчеты показали, что расхождение результатов расчета с использованием модели гистерезиса Jiles D.C., Atherton D.L. и однозначных характеристик намагничивания относительно невелико. В частности, при использовании расчетной однозначной характеристики различие в

результатах расчета действующих значений первой гармоники вторичного тока не превысило 1%. Это позволяет сделать вывод, что с достаточной для практики релейной защиты и автоматики точностью (при выполнении критерия применимости однозначной характеристики намагничивания) допустимо использовать указанную характеристику в моделях в ТТ и их групп.

Результаты расчетов процессов в группе ТТ, соединенной в звезду

Для подтверждения возможности переноса разработанной библиотеки моделей групп ТТ в RTDS simulator с помощью модуля CBuilder графического пользовательского интерфейса RSCAD была реализована модель группы ТТ, соединенной в звезду.

В модуле RunTime были получены осциллограммы выходных сигналов разработанной модели группы ТТ, соединенной по схеме звезда (рис. 6). Моделировался симметричный нагрузочный режим с первичными токами порядка 200 А, переходящий в режим однофазного КЗ в фазе *A*. В сердечнике ТТ фазы *B* имелась остаточная магнитная индукция неблагоприятного знака около 0,68 Тл.

Осциллограммы показывают, что благодаря напряжению на нулевом проводе вторичных цепей ТТ, соединенных в звезду, сердечник ТТ неповрежденной фазы *B* насытился примерно через 20 мс после возникновения КЗ. Это привело к появлению тока во вторичной цепи указанного ТТ, превышающего ток нагрузки и отличающегося от него по фазе. Это может оказать влияние на работу устройств релейной защиты и автоматики.

Данный пример показывает необходимость учета процессов в группах ТТ при испытаниях устройств релейной защиты и автоматики.

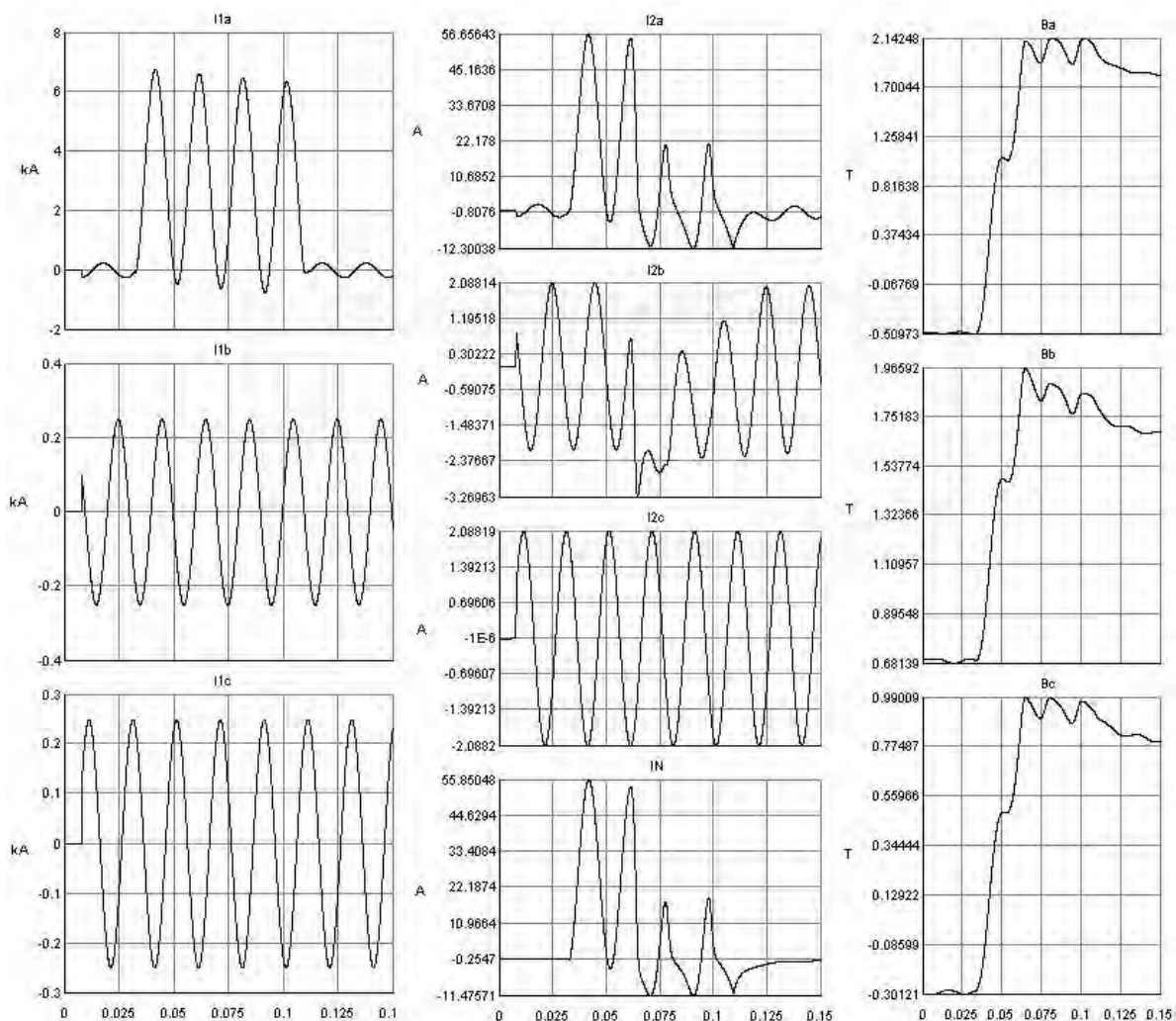


Рис.6: Осциллограммы выходных сигналов модели

группы ТТ, соединенной по схеме звезда

2 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработаны математические модели групп ТТ со схемами соединения: звезда, неполная звезда, треугольник, последовательное и параллельное соединения ТТ, схемы на разность (сумму) токов, дифференциальных схем (однофазной и трехфазной). Указанные модели имеют потенциальную возможность проведения расчетов процессов в группах ТТ в реальном времени в составе программного обеспечения RTDS simulator. В последнем в настоящее время используется модель одиночного ТТ, что не всегда достаточно для анализа поведения устройств РЗА в переходных режимах с насыщением сердечников электромагнитных ТТ.

На примере расчета переходного процесса в группе ТТ, соединенных в звезду, показана возможность неселективного действия РЗА в случае насыщения сердечника ТТ, не обтекаемого током КЗ. Последнее объясняется влиянием остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в сердечнике ТТ, напряжения на нулевом проводе схемы звезды и апериодической составляющей в токе КЗ. Полученный результат имеет практическое значение.

Направление дальнейшей работы заключается в доработке разработанных программ расчета к виду, соответствующему требованиям к элементам библиотеки RSCAD.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 60044-6 (1992-03): Instrument Transformers, Part 6: Requirements for protective current transformers for transient performance.
- [2] IEEE/ANSI C.57.13 (1986): Standard Requirements for Instrument Transformers.
- [3] BS (British Standard) 3938 (1982): Current Transformers.
- [4] Jiles D.C., Atherton D.L. Theory of ferromagnetic hysteresis/ Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61. – 1986. С.48-60.
- [5] О. Баглейбтер Реализация модели трансформатора тока в Simulink® на основе теории гистерезиса Джилса-Атертона (Jiles-Atherton). – Релейщик, 2014, № 01 (17), с. 10 – 15.
- [6] А. Д. Дроздов Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 210 с.
- [7] Э.В. Подгорный, С.Д. Хлебников. О выборе расчетной характеристики трансформаторов тока в переходных режимах. - Электричество, 1966, № 9, с. 87 – 90.
- [8] Новаш В. И., Сопьяник В. Х. Расчет переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит. Электричество, 1982, № 7, с. 74 -76.
- [9] Богдан А. В. Повышение технического совершенства устройств защиты с ферромагнитными элементами на основе вычислительного эксперимента. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новочеркасск, 1994. – 36 с.
- [10] Кужеков С. Л. О методах расчета переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока. – Электричество, 1975, № 7, с. 74 -77.
- [11] Метод расчета токовой и угловой погрешности трансформаторов тока при глубоком насыщении сердечника. /К. С. Дмитриев, В. Е. Казанский, Е. П. Королев, Э. М. Либерзон. - Электричество, 1967, № 12, с. 39 – 43.
- [12] Дроздов А. Д., Кужеков С. Л. Исследование формы вторичного тока защитных трансформаторов тока в переходных и установившихся режимах. – Электричество, 1971, № 4, с. 27 - 32.



С.3-6. Использование полиномиальной аппроксимаций в перспективных алгоритмах цифровой обработки сигнала устройств РЗА

К.И. АПРОСИН
Прософт-Системы
Россия
aprosin.ki@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

получение действующих значений, цифровая обработка сигнала, свертка по полиному, быстродействующие защиты.

1 ВВЕДЕНИЕ

С момента появления цифровых устройств РЗА основным способом получения действующих значений остается круговая свертка сигнала в форме быстрого или дискретного разложения Фурье. Этот метод широко распространен в промышленности и имеет высокоэффективные реализации. Однако, применительно к цифровой РЗА, этот метод имеет ряд недостатков. Основные из них:

- ограничение времени реакции величиной периода основной частоты,
- неприменимость метода при резком (непериодическом) изменении сигнала
- получение ложных значений частоты и фазы при отсутствии или насыщении сигнала.

Альтернативой круговой свертке является полиномиальная свертка сигнала. Такой метод не имеет прямой привязки к периоду сигнала и потенциально может дать времени реакции устройства РЗА меньшие периода основной частоты. Основным вопросом является вопрос предварительной фильтрации сигнала от высших гармоник. Фильтрованный сигнал теряет часть информации о начале короткого замыкания и становится малоприменимым для относительно точного выделения параметров основной частотной составляющей сигнала. Практическое решение является компромиссом между точностью вычисленных фазы и амплитуды сигнала и неустраняемой задержкой их вычисления.

В статье приводятся некоторые практические результаты разработки альтернативных методик вычисления действующих значений, а также требования к алгоритмам цифровой обработки сигнала быстродействующих устройств защиты и автоматики.

2 СВЕРТКА ПО ПОЛИНОМУ КАК АЛЬТЕРНАТИВА КРУГОВОЙ СВЕРТКИ.

В общем случае свертка по полиному может быть сколь угодно близка к круговой свертке, если аппроксимирующий полином представляет собой ряд Тейлора. Разница между сверткой по синусоидам и по полиному ряда Тейлора будет определяться только числом членов ряда (и, соответственно, максимальной степенью полинома). Однако прямая реализация такого подхода не дает преимуществ перед сверткой по синусоидам. С практической точки зрения свертка по полиному интересна в том случае если она устраняет недостатки круговой свертки при получении действующих значений.

На практике для получения действующих значений и фаз основной частоты тока или напряжения целесообразно применять алгоритм круговой свертки для одной частотной составляющей, известный как алгоритм Герцеля.

$$Z_n = \sum_{n=0}^N \left(in + Z_{n-1} 2\cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - Z_{n-2} \right)$$
$$out = \left(Z_{N-1} \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - Z_{N-2} \right) + j \left(Z_{N-1} \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right)$$

В этом случае вычисления на шаге ограничиваются перемножением на заранее вычисленные значения опорных синусоид заданной частоты. Вычисления синуса и косинуса должны производиться только при изменении основной частоты. При наличии достаточного ресурса памяти вычисления тригонометрических функций можно вообще избежать, используя заранее заполненную таблицу значений синусов косинусов и рекуррентные формулы для вычисления промежуточных значений.

Из вышесказанного следует, что экономичная реализация круговой свертки будет иметь низкие вычислительные затраты, сводящиеся к однократному доступу к исходным данным, вычислительная сложность этой операции $O(N)$. Применение другого типа свертки не приведет снижению вычислительных затрат, т.к. основное время при вычислении свертки в любом случае займет доступ к данным.

Основной недостаток круговой свертки – необходимость одного периода основной частоты для вычисления действующего значения и фазы сигнала. Полиномиальная свертка позволяет получать модуль и фазу сигнала на интервалах времени меньших одного периода основной частоты. Это свойство может быть использовано для быстродействующих направленных (или дифференциальных) защит, использующих амплитуду и фазу измеренного сигнала.

3 ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТКИ ПО ПАРАБОЛЕ

Для измерения фазы и уровня чистого синусоидального сигнала на коротких интервалах времени целесообразно использовать частный случай полиномиальной свертки – свертку по параболе. По результатам такой свертки можно получить уровень и момент наступления экстремума сигнала, которые могут быть пересчитаны в модуль, фазу и период сигнала. Периодом сигнала можно считать интервал времени между текущим найденным и предшествующим экстремумом того же вида. За фазу сигнала можно принять дробную часть отношения интервала между текущим экстремумом и произвольным началом отсчета к текущему значению периода сигнала. Действующее значение сигнала может быть получено путем перемножения уровня экстремума на коэффициент формы синусоиды. При этом необходимо учесть наличие постоянной составляющей сигнала. Постоянную составляющую (или медленно затухающую экспоненту) можно учесть путем вычитания из полученной величины экстремума значения синусоиды взятого за четверть периода до (или после) момента наступления периода. Этот момент времени соответствует переходу синусоиды через ноль, значение уровня сигнала в этот момент показывает уровень постоянной составляющей. Если постоянная составляющая (или экспонента) меняются достаточно медленно, то можно считать, что в момент наступления экстремума постоянная составляющая имеет тоже значение, что и за четверть периода до (или после) наступления максимума.

Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
01 – 05 июня 2015 г., Сочи

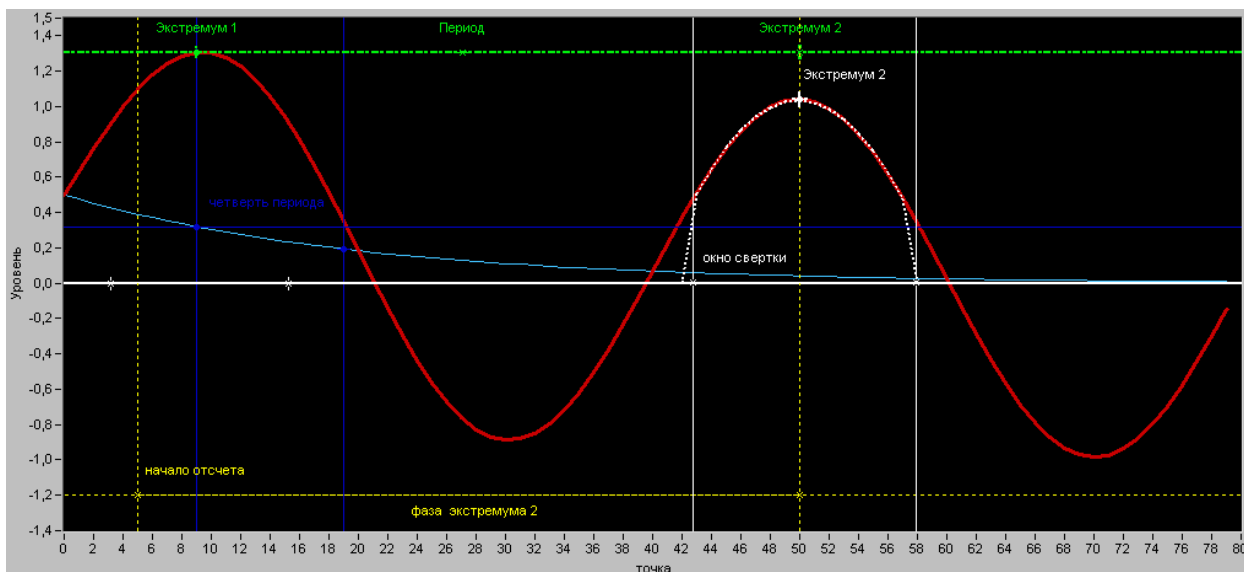


Рис.1. Вычисление модуля, фазы и периода сигнала при помощи параболической свертки с учетом постоянной составляющей

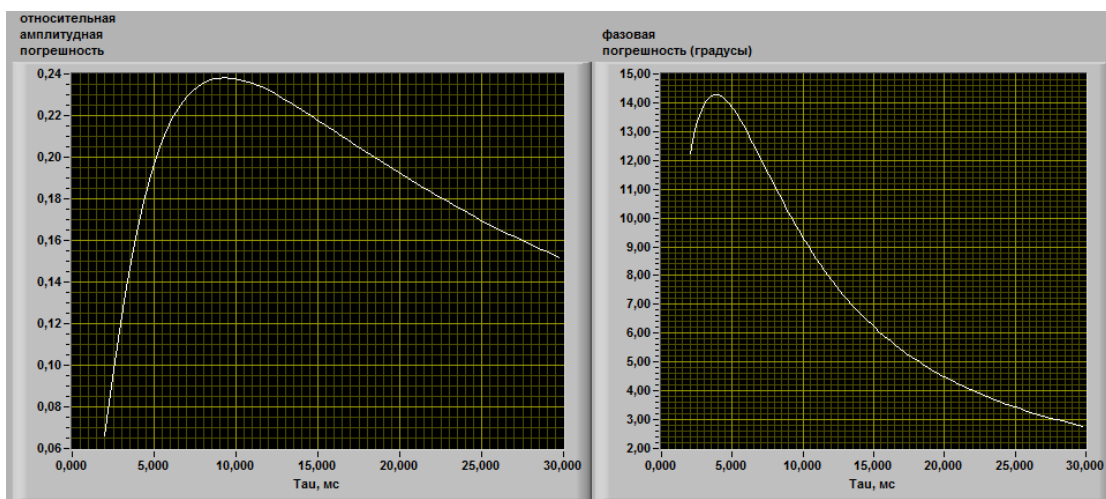


Рис.2. Зависимости амплитудной и фазовой погрешностей замера от постоянной затухания

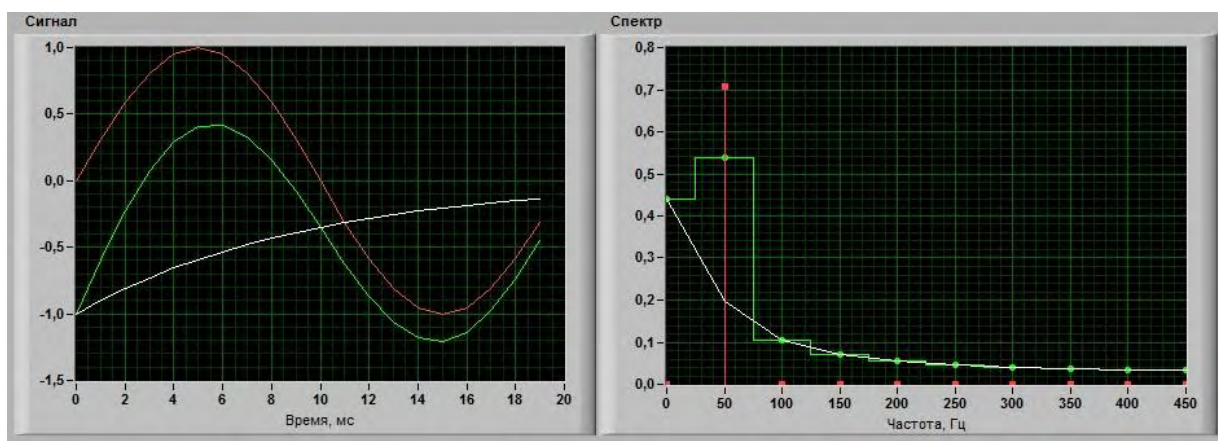


Рис.3. Максимально возможное искажение действующего значения замера вызванное наличием аperiodической составляющей

Экспонента: $A(t) = A_0 e^{wt}$, $w = -0.109$, $Tau = 9.2$ с
Коэффициент искажения основной гармоники 0,2434

Однако точность нахождения параметров экстремума зависит как от размера окна свертки так и от того насколько экстремум близок к центру окна, на котором производится свертка. Поэтому параболическая свертка в произвольной точке синусоидального сигнала не позволит вычислить параметры сигнала с заранее заданной точностью. Приблизительно экстремум может быть найден по уровню сигнала, после чего в этом месте синусоиды можно выполнить свертку по параболе для вычисления точных параметров экстремума. На практике проще производить свертку по параболе с постоянным сдвигом (например, на один отсчет) далее вычислять изменение параметров экстремума относительно предшествующего значения. Минимум изменения параметров экстремума при сдвиге окна свертки будет соответствовать истинному значению экстремума с точностью, определяемой шагом, с которым производится свертка. Такой метод достаточно затрачен с точки зрения вычислительного ресурса, но позволяет достичь заранее заданной точности. Кроме того интервал времени между двумя соседними минимумами равен значению полупериода сигнала с точностью определяемой шагом свертки.

Все вышесказанное относится к чистой синусоиде и не может быть напрямую применено к замерам тока и напряжения сети. Для использования параболической свертки необходимо удалить из сигнала высшие гармоники и непериодические шумы. Наибольшее искажение экстремума, найденного при помощи параболической свертки, дают высокочастотные составляющие сигнала, с частотой, близкой к основной. В электрической сети это вторая, третья и пятая гармонические составляющие. Четные гармоники не могут распространяться в электрической сети, однако вторая гармоника может появляться при насыщении сердечников прилегающих к точке замера трансформаторов. Третья и пятая гармонические составляющие обычно связаны с процессами, протекающими в нейтрали. Исходя из вышесказанного, в измеренном сигнале необходимо отфильтровать четные высокочастотные составляющие и вторую гармонику. Использование простых низкочастотных фильтров неприменимо в данной задаче т.к. для второй гармоники такой фильтр даст чрезвычайно большую задержку выходного сигнала и существенно исказит переходные процессы.

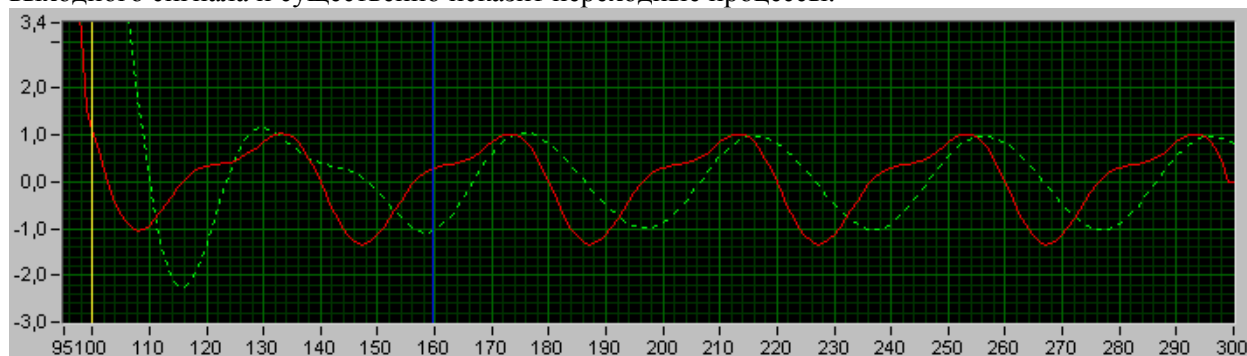


Рис.4. Подавление 2-й гармонической составляющей в 10 раз с задержкой 5 мс в установившемся режиме и 30 мс в переходном режиме

Решением данной задачи может быть каскад режекторных фильтров и ФНЧ настроенного на частоту седьмой гармоники. Каждый из режекторных фильтров должен значительно (примерно в 10 раз) ослаблять свою высокочастотную составляющую и иметь чрезвычайно узкую полосу подавления. Режекторными фильтрами необходимо ослабить вторую, третью и пятую гармоники. Результаты исследования показали, что применение режекторных фильтров, соответствующих диапазону основной частоты 45...55 Гц не позволяет получить малую задержку и искажение в переходном процессе. Поэтому на практике имеет смысл настраивать режекторные фильтры в реальном времени на измеренную частоту плюс минус пол Герца. Каскад адаптивных по частоте режекторных фильтров позволяет получить задержку сигнала в медленно меняющихся режимах порядка 2 мс. Однако при резком изменении режима даже такой каскадный фильтр даст существенное искажение сигнала на интервалах до полупериода основной частоты. Это в первую очередь связано с накопленными в фильтре значениями предшествующего режима. При близком коротком замыкании в электрической сети замер напряжения резко снижается, фильтр замедляет это снижение, что ведет к существенному

искажению сигнала в начальные моменты переходного процесса (см. рис). При этом в сигнале тока аналогичный эффект отсутствует, т.к. уровень сигнала нового (аварийного) режима существенно превышает уровень исходного режима, в этом случае время выхода фильтра на новый режим практически не превышает его задержку в установившемся режиме (выхода занимает те же 2 мс).

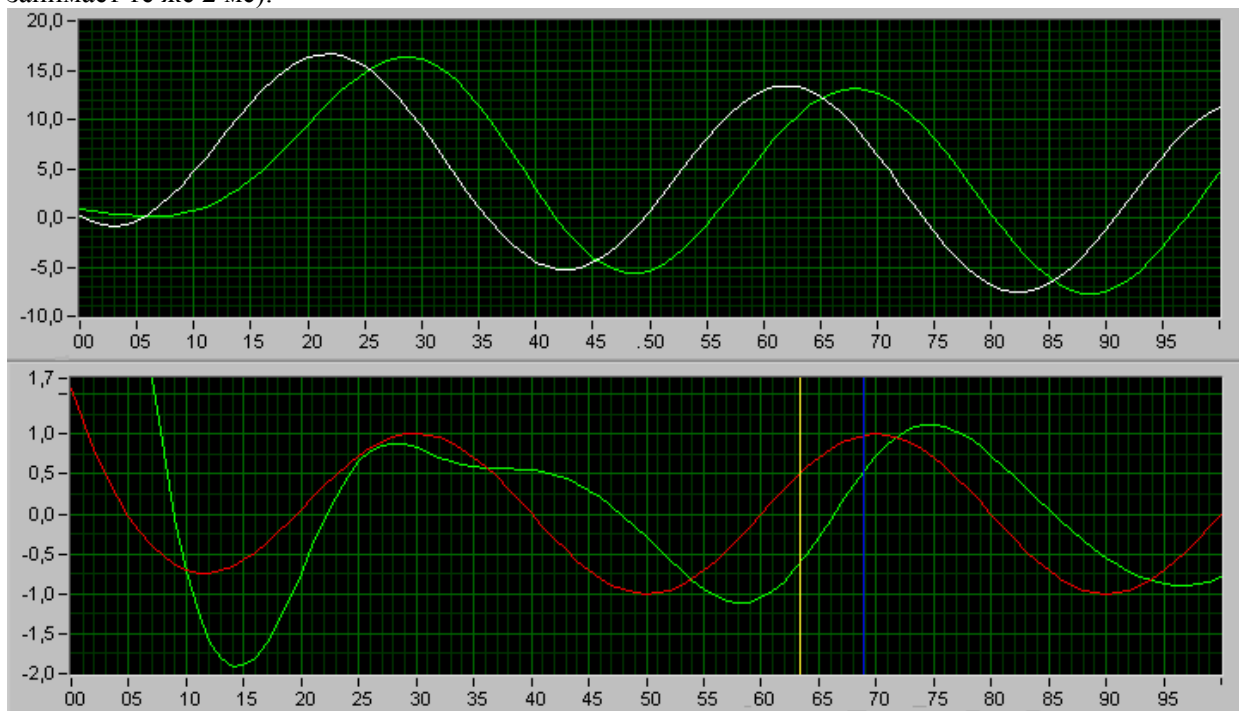


Рис.5. Искажение сигнала падающего напряжения и возрастающего тока при КЗ (нарастающий сигнал сверху, убывающий сигнал снизу)

Проблема искажения замера падающего напряжения при КЗ может быть решена путем обнуления внутренних переменных фильтра в момент начала короткого замыкания.

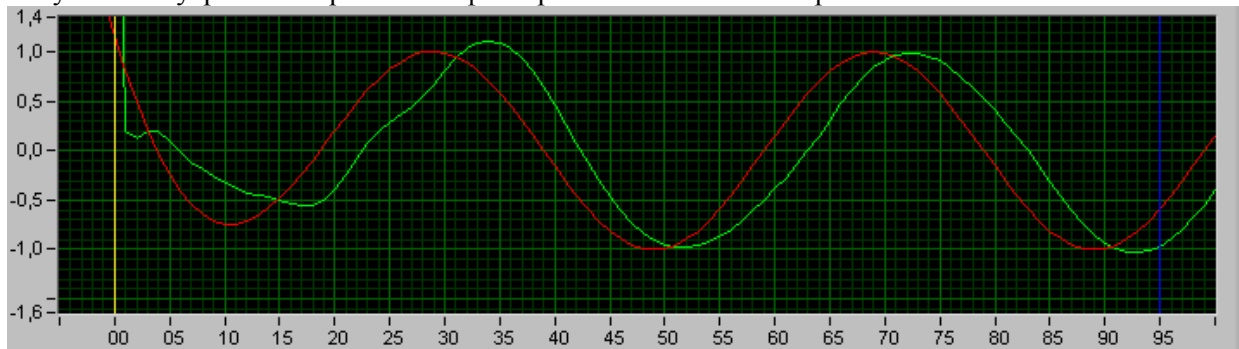


Рис.6. Эффект обнуления сигнала падающего напряжения в момент начала КЗ (убывающий сигнал)

Такое техническое решение требует относительно точного нахождения момента начала переходного процесса. Момент начала переходного процесса может быть найден только методом, не зависящим от начальной фазы сигнала, таким как круговая свертка. Практически начало переходного процесса можно найти по резкому изменению параметров (амплитуды и фазы) полученных путем круговой свертки, производимой с небольшим сдвигом по времени. Чем меньше сдвиг одной круговой свертки относительно другой, тем выше точность нахождения начал переходного процесса.

4 РЕЗУЛЬТИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ БЫСТРОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛА.

Практическая реализация вычислителя может работать по следующему алгоритму

Массив мгновенных замеров поступает на каскадный частотный фильтр. Полученный после фильтра массив содержит только основную частотную составляющую (и экспоненциальную составляющую, если таковая имеется в сигнале). Далее отфильтрованный массив мгновенных замеров одновременно попадает в два вычислителя: вычислитель круговой свертки и вычислитель параболической свертки. Оба вычислителя производят свертку, сдвигая массив исходных замеров на заданное число точек. По результатам работы вычислителя круговой свертки фиксируется момент резкого изменения сигнала. По результатам работы вычислителя параболической свертки фиксируется момент наступления экстремума сигнала, в этот момент вычисляются параметры экстремума, а по ним пересчитываются частота, фаза и амплитуды измеряемого сигнала. В момент резкого изменения все внутренние переменные фильтра обнуляются.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ – СВОЙСТВА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА

Время реакции предложенного алгоритма на резкое изменение режима будет ограничено временем выхода на режим частотного фильтра и с учетом временного интервала, необходимого для параболической составит порядка 10 мс. Точность вычисления параметров сигнала в начальный момент переходного процесса составит 20% по уровню и 15 градусов по углу. Оба параметра определяются наличием экспоненты в замере и не могут быть улучшены без изменения времени реакции. Точность вычисления определяется аппаратной частью вычислителя, сам алгоритм может производить вычисления с точностью, определяемой частотным фильтром. Применение предложенного алгоритма гарантированно исключает появление промежуточных значений при резком изменении сигнала.

Сфера применения такого алгоритма – реализация защит без выдержки времени с реакцией менее периода основной частоты. На основе алгоритма могут быть реализованы дифференциальные и направленные защиты. Основными проблемами практической реализации предложенного алгоритма являются его требовательность к вычислительным ресурсам и исключительно сложная программная реализация.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. /М.: Энергоатомиздат, 2007. 549 с.
- [2] Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002.608 с
- [3] Голд Б. Рейдер Ч. Цифровая обработка сигналов. /М.: «Сов. радио» 1973. 368 с



С.3-7. Методика эффективного расчета переходного процесса ЭЭС на параллельном вычислителе с общей памятью

К.И. АПРОСИН, С.И. СЕМЕНЕНКО
Прософт-Системы, УрФУ
Россия
aprosin.ki@gmail.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Централизованная противоаварийная автоматика, расчет электромеханического переходного процесса, противоаварийная автоматика по принципу «после», параллельные вычисления.

1 ВВЕДЕНИЕ

Одним из главных ограничений в управлении устойчивостью энергосистемы это невозможность рассчитывать будущие параметры режима энергосистемы в режиме реального времени. На данный момент возможно рассчитать будущий установившийся режим и предсказать переходные процессы по известному предшествующему режиму для энергосистем любого размера. Однако, результат вычислений режима может быть получен только позднее наступления этого режима. Ситуация мало изменилась после последней революции вычислительных систем, в последнее десятилетие прогрессом был возрастающий параллелизм. Вычислительная способность возросла на порядки [1]. Современные вычислители состоят из $10^3 \dots 10^5$ ядер, работающих одновременно. Суммарная вычислительная способность таких систем около $10^{12} \dots 10^{16}$ Flops. Однако, вычислительная способность единичных ядер со временем не растет. Вычислительная способность (число операций в секунду) увеличивается довольно медленно (около 10% от старшего семейства процессоров к младшему). Таким образом, современные вычислительные системы – системы глубоко параллельные и требуют разработки полностью параллельных алгоритмов [2]. Однако, большинство существующих алгоритмов разработаны для последовательных вычислителей. Эта проблема ограничивает применение высокопроизводительных вычислителей в научных и технических проблемах. Расчет режимов энергосистем – одна из них.

Расчет режима энергосистемы это вычислительная задача, основанная на решении разреженных систем линейных уравнений [3]. Уровень разреженности матрицы проводимости – один ненулевой элемент к тысяче нулевых. Система уравнений, в зависимости от постановки задачи, может быть линейной и нелинейной. В настоящее время, системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) режимов традиционно решаются методами, подобными методу Гаусса, а нелинейные – методом Ньютона, с поиском начальных приближений методом Гаусса-Зейделя. Все эти методы разработаны для последовательных вычислителей и малоэффективны при параллельных расчетах.

Если энергосистема смоделирована уравнениями баланса токов, решаемая система уравнений будет линейной. Если же режим системы смоделирован уравнениями баланса мощностей, то система будет нелинейной. Модель установившегося режима энергосистемы – нелинейна и решается Ньютоно-подобными методами. Ядром метода Ньютона является

линеаризация уравнений на шаге метода. Матрица решаемой на шаге линейной системы (Якобиан) полностью меняется от шага к шагу. Для задач энергосистем, Якобиан имеет ту же заполненность, что и матрица проводимостей. Соответственно, использование метода Ньютона предполагает решение системы линейных уравнений того же размера и с теми же индексами ненулевых элементов, что и система линейных уравнений линейной модели. Обе модели требуют параллельный решатель больших разреженных систем линейных уравнений. На настоящее время системы линейных уравнений решаются двумя главными способами – методом Гаусса и методом простой итерации.

Параллельный расчет установившегося режима – это ключевая технология, способная полностью изменить оперативное и противоаварийное управление. Технология начнет развиваться только при условии разработки параллельного решателя разреженных систем линейных уравнений.

2 СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ

2.1 Классический метод Гаусса

Метод Гаусса основан на последовательном исключении уравнений. В данном методе распараллеленной может быть только процедура исключения строки [4]. Уровень параллелизма процедуры будет падать от одной исключаемой строки к другой, так как размер матрицы уменьшается при исключении строки. Выше было отмечено, что модель электрической сети имеет сильно разреженную матрицу. В этом случае процедура исключения строки не требует большого объема вычислений и не может быть эффективно распараллелена. Если в исключаемой строке M ненулевых элементов, процедура исключения требует $M \times M$ параллельных потоков. Каждый поток умножает элементы исключаемой строки на значение ведущего элемента и вычитает результат из строк ниже. К примеру, если первоначальная матрица имеет три ненулевых элемента на строку, используются только девять параллельных элементов.

2.2 Метод простой итерации

Метод простой итерации лучше подходит для параллельных вычислительных систем. Число параллельных потоков, задействованных на каждой итерации равно числу уравнений решаемой системы (размерности решаемой системы). Более того, метод позволяет параллельное умножение и сложение по строке. Несмотря на высокий уровень параллелизма, простая итерация едва ли может быть использована как основной метод расчета режимов. Это метод с самой низкой скоростью из возможных. Метод простой итерации, использованный в методе Ньютона сокращает скорость сходимости последнего.

2.3 Методы пространств Крылова

Это группа итерационных методов, которые широко применяются для прикладных вычислений в различных областях науки и техники. В настоящее время, большинство используемых методов на пространствах Крылова – это обобщенный метод минимальных невязок, метод сопряженных градиентов (для симметричных матриц), или метод бисопряженных методов (для несимметричных матриц). Реализации этих методов имеют довольно большую параллельную часть. Но эти методы требуют решения заполненной системы линейных уравнений на каждой итерации. Размерность решаемой на итерации системы намного меньше, чем размерность решаемой методом системы. Однако, размерность системы, решаемой на каждой итерации, меняется от итерации к итерации и максимальный размер зависит от сходимости метода. Эта часть метода не может быть эффективно реализована на параллельных вычислителях. Таким образом, реализация метода требует вычислитель, состоящий из параллельной и последовательной частей. Эффективность таких вычислителей ограничена связью между этими частями. Вторая проблема итерационных методов на пространствах Крылова это сильное ограничение на обусловленность матриц. Реальные матрицы электрических систем часто имеют плохую обусловленность, которая не может быть улучшена простыми методами.

2.4 Метод Крамера

Существует другой прямой решения систем линейных уравнений. Системы линейных уравнений могут быть решены через определители методом Крамера [8]. Определитель является суммой произведений элементов матриц. Все произведения не зависят друг от друга и могут быть выполнены параллельными потоками. Суммирования произведений могут быть выполнены параллельной редукцией. Таким образом, этот прямой метод может иметь эффективную параллельную реализацию. Однако, реализация этого метода не может быть реализована на практике. Проблема – значение определителя. Она растет экспоненциально с ростом размерности матрицы. Каждая компонента определителя содержит произведение N элементов, где N – размерность матрицы. N произведений даст в результате степень десятки такую, какую дало бы умножение N элементов со средней степенью. К примеру, если бы элементы матрицы в среднем имели бы порядок 10^2 , для чисел с двойной точностью максимальная размерность матрицы была бы 154 и 19 для чисел с одинарной. Матрицы с более высокими размерностями будут иметь компонентой определителя бесконечность и не будут вычислены. Элементы матрицы проводимости имеют отрицательные степени, что не меняет проблему. Нулевые, или бесконечные значения определителя могут появляться и в том случае, если один элемент матрицы имеет относительно большое (малое) значение. Это случай плохо обусловленной матрицы. Чтобы предотвратить экспоненциальный рост произведений, необходимо, чтобы элементы матриц имели нулевые степени десятки и порядки произведений, что предполагает умножение элементов с разными знаками степеней. Таким образом, процесс перемножений должен сопровождаться сортировкой. Кроме того, число операций, необходимых для прямого вычисления определителя через миноры имеет факториальную зависимость от размерности матрицы, что является неприемлемым для современных параллельных вычислительных систем, поэтому, в настоящее время не существует реализации метода для разреженных матриц с большими размерностями в основных математических библиотеках.

2.5 Проблема отсутствия приемлемого метода расчета СЛАУ

Представленные выше существующие методы решения СЛАУ не имеют реализаций в параллельных математических библиотеках в качестве универсальных решателей [5]. Ни один из приведенных методов не может одновременно обеспечить гарантированную сходимость низкий объем вычислений и приемлемый уровень параллелизма (порядка нескольких сотен потоков) для сетей из нескольких тысяч узлов.

3 РАСЧЕТ СЛАУ ЦЕПОЧКАМИ

Ниже приводится альтернативный узкоспециализированный метод расчета СЛАУ, характерных для задач расчета электрических сетей. Метод основан на знании свойств топологии исходной электрической сети. Сеть можно представить как множество несвязанных между собой цепочек из межузловых связей. Каждая цепочка содержит некоторое число узлов, в реальной сети каждая пара таких узлов соединена прямой связью. Все связи узла, кроме двух попадающих в цепочку, отбрасываются. Каждый из узлов попадает только в одну цепочку. Чтобы топология модели совпала с топологией моделируемой сети необходимо только добавить те связи, которые соединяют отдельные цепочки между собой и были отброшены при формировании цепочек. Число добавляемых цепочек невелико т.к. узел электрической сети обычно имеет 3...5 связей (в зависимости от класса напряжения сети). На рисунке приведен пример сети поделенной на 5 цепочек (им соответствуют тонкие линии) соединенных 5-ю связями (им соответствуют жирные линии). Слева приведен портрет соответствующей этой сети матрицы проводимостей, на котором ярко зеленым цветом отмечены ненулевые элементы.

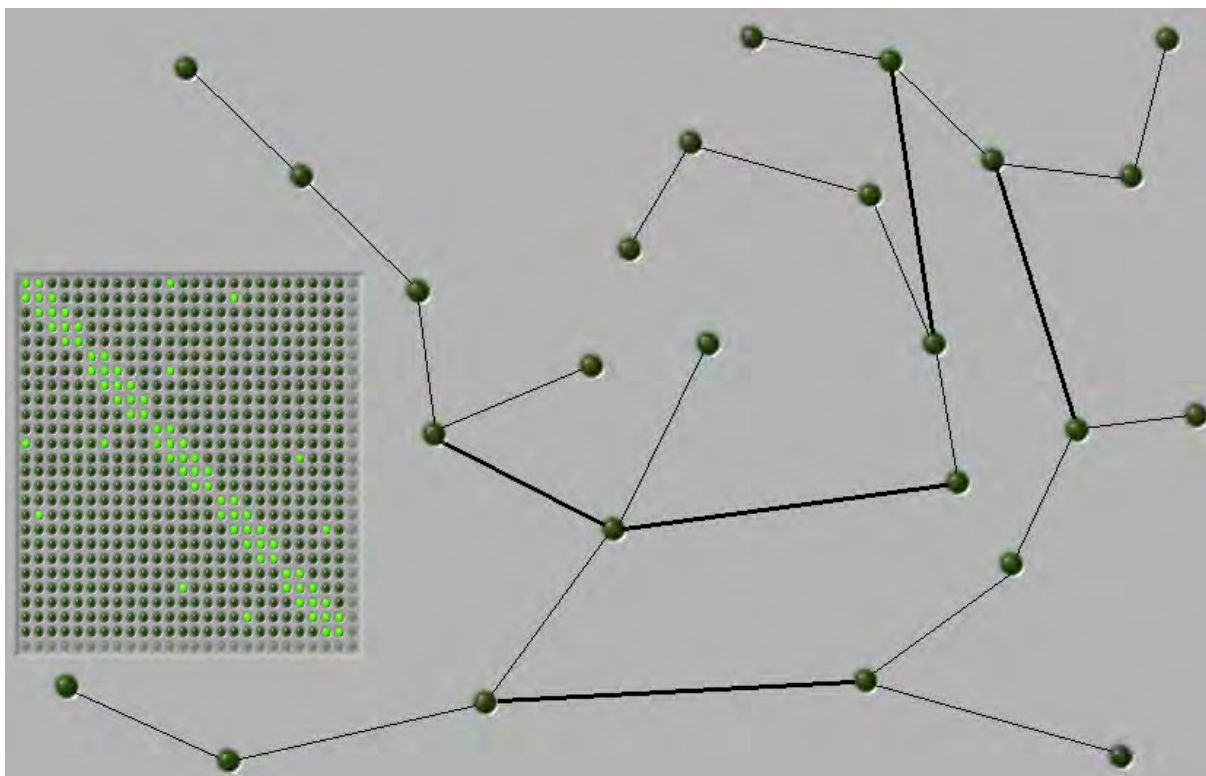


Рис. 1: Схема электрической сети в виде цепочек и связей, объединяющих цепочки

СЛАУ, описывающая каждую из цепочек является трехдиагональной и может быть решена методом прогонки [10]. Метод прогонки имеет эффективные параллельные реализации [2], [4]. Объединение отдельных цепочек производится через вычисление отдельных столбцов обратной матрицы. Применительно к задаче расчета электрической сети этот метод описан в [9] под названием «Метод экспресс-оценки потокораспределения при коммутациях в электрической сети».

Суть метода заключается в решении дополнительной системы линейных уравнений, учитывающей изменения матрицы проводимостей, связанные с тем, что в сеть, режим которой уже посчитан, добавляется еще одна дополнительная связь. Метод позволяет посчитать новый режим сети с минимальными вычислительными затратами. Исходными данными метода являются матрица проводимостей сети, вектор предварительно вычисленных напряжений и проводимость добавляемой связи. В качестве свободного члена дополнительной системы линейных уравнений используется вектор предварительно вычисленных напряжений (обозначен как U'). В правой части системы находится сумма единичной матрицы и двух столбцов обратной матрицы, номера которых соответствуют номерам узлов соединяемых добавляемой связью.

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & \dots & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & \dots & 0 \\ d_{31} & d_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U'_1 \\ U'_2 \\ U'_3 \\ \vdots \\ U'_N \end{bmatrix}$$

Непустые (имеющие ненулевые элементы) столбцы матрицы D могут быть получены по известному разложению исходной матрицы проводимостей и известным новым значениям изменившихся элементов матрицы проводимостей. Для этого, сначала получается разность старой и новой матрицы проводимостей:

$$\overline{\overline{dY}} = \overline{\overline{Y}} - \overline{\overline{Y}}$$

Разностная матрица имеет ненулевые элементы только в двух столбцах (показано для добавления связи узлов 1 и 2):

$$\begin{bmatrix} dY_{11} & dY_{12} & 0 & \dots & 0 \\ dY_{21} & dY_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Для каждого из столбцов полученной матрицы решается СЛАУ с исходной матрицей проводимостей (показано для добавления связи узлов 1 и 2):

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ \vdots \\ d_{N1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dY_{11} \\ dY_{21} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{12} \\ d_{22} \\ d_{32} \\ \vdots \\ d_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dY_{12} \\ dY_{22} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Если исходная матрица является трехдиагональной, то решение данной системы также может быть получено методом параллельной прогонки, имеющим эффективную реализацию на современных вычислительных устройствах.

При добавлении нескольких связей изменится только число столбцов. Например, при добавлении двух связей (1-2 и 4-5) систему можно записать как:

$$\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & d_{15} & \dots & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & d_{24} & d_{25} & \dots & 0 \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} & d_{35} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & 0 & d_{N4} & d_{N5} & \dots & 0 \end{bmatrix} \right) \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \\ \vdots \\ \dot{U}_N \end{bmatrix}$$

При нескольких изменениях в одном и том же столбце матрицы проводимостей, допустимо считать столбец матрицы D для каждого из изменений в отдельности, а потом складывать результаты:

$$\begin{bmatrix} \dot{d}_{11} & \dot{d}_{12} & 0 & \dots & 0 \\ \dot{d}_{21} & \dot{d}_{22} & 0 & \dots & 0 \\ \dot{d}_{31} & \dot{d}_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{d}_{N1} & \dot{d}_{N2} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{d}_{11} & 0 & \ddot{d}_{13} & \dots & 0 \\ \ddot{d}_{21} & 0 & \ddot{d}_{23} & \dots & 0 \\ \ddot{d}_{31} & 0 & \ddot{d}_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{d}_{N1} & 0 & \ddot{d}_{N3} & \dots & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{d}_{11} + \ddot{d}_{11} & \dot{d}_{12} & \dot{d}_{13} & \dots & 0 \\ \dot{d}_{21} + \ddot{d}_{21} & \dot{d}_{22} & \dot{d}_{23} & \dots & 0 \\ \dot{d}_{31} + \ddot{d}_{31} & \dot{d}_{32} & \dot{d}_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \dot{d}_{N1} + \ddot{d}_{N1} & \dot{d}_{N2} & \dot{d}_{N3} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Получившаяся в результате суммирования матрица является вырожденной. Из нее нужно исключить все строки и столбцы, изменений в которых не было, и решить полученную систему малой размерности. Результатом будут напряжения узлов, к которым были добавлены связи. Напряжения остальных узлов будут вычислены по полученным напряжениям узлов с добавленными связями и столбцам обратной матрицы, так как это делается в обратном ходе метода Гаусса.

Для данной задачи такое вычисление имеет ряд особенностей, существенно облегчающих вычисления. Ввиду того, что цепочки узлов исходно не связаны между собой, при добавлении связи ненулевые значения появляются только в тех элементах столбцов обратной матрицы, которые принадлежат той цепочке, к которой добавляется связь. Это уменьшает число появляющихся ненулевых элементов каждого столбца пропорционально числу цепочек (при условии, что их длина примерно одинакова). Общее число дополнительных ненулевых элементов можно оценить как $2n \cdot m$, где n – число узлов в цепочке, а m – число цепочек. На рисунке ниже слева направо приведены: исходная матрица проводимостей, состоящая из 5-ти цепочек и 5 дополнительных связей; 5 трехдиагональных матриц для расчета режима отдельных цепочек и сумма единичной матрицы со столбцами обратной матрицы. Из рисунка

видно, что последняя корректирующая матрица остается слабо заполненной, ее заполненность можно оценить как $(2n-m)/(n-m)^2$.

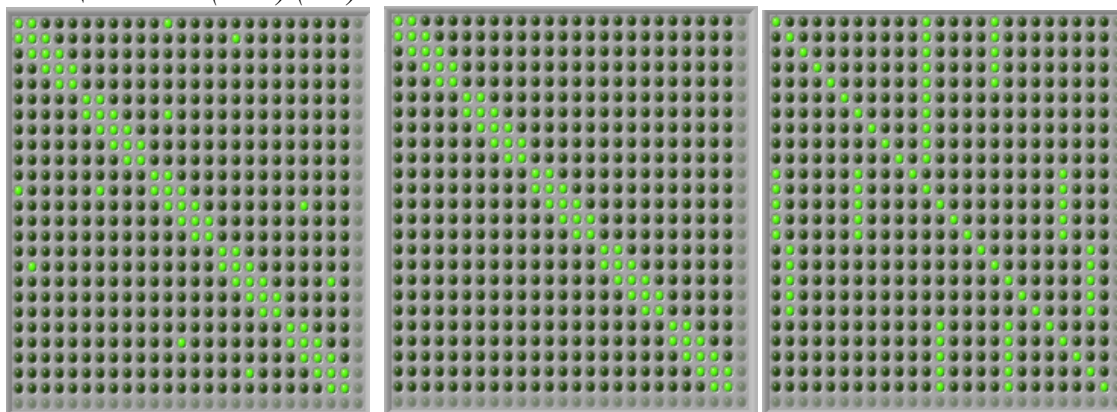


Рис. 2: Матрица проводимостей сети, трехдиагональные матрицы цепочек узлов и корректирующая матрица.

При вычислении значений напряжения узлов, к которым добавляются новые связи, необходимо решить СЛАУ с плотной матрицей, состоящей из элементов столбцов обратной матрицы, соответствующих этим узлам. Размер этой матрицы равен числу добавляемых связей. Этот этап накладывает ограничения на число добавляемых связей. При большом количестве добавляемых связей размер плотной матрицы может стать сопоставимым с размером исходной задачи, в этом случае решение данным методом потеряет смысл.

4 ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА СЛАУ ЦЕПОЧКАМИ НА СОВРЕМЕННОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЕ С ОБЩЕЙ ПАМЯТЬЮ

В настоящее время параллельные вычислительные устройства с общей памятью имеют два уровня параллелизма: параллелизм внутри процессора и параллелизм по процессорам. Физически современное вычислительное устройство состоит из нескольких процессоров каждый из которых способен производить вычисления сразу над целым массивом чисел. В терминах программирования графического процессора параллелизм по процессорам называется параллелизмом по блокам, а параллелизм внутри процессора называется параллелизмом по потокам. Соответственно расчетный алгоритм также должен иметь два уровня параллелизма. В большинстве параллельных вычислительных системах каждый процессор имеет свою собственную «быструю» память и общую «медленную» память. Соответственно, эффективный параллельный алгоритм должен быть устроен так чтобы исключить (или ограничить) обмен данными между параллельными расчетными процедурами, выполняющимися на разных процессорах. Применительно к приведенному выше алгоритму расчета СЛАУ можно сказать, что каждая из цепочек должна рассчитываться на своем отдельном процессоре. Если число цепочек больше числа процессоров, то каждый процессор должен посчитать несколько цепочек одну за другой. Эффективность алгоритма будет определяться эффективностью расчета отдельной цепочки, равномерностью длин различных цепочек и кратностью числа цепочек к числу процессоров. Если все цепочки будут разной длины, то наиболее короткие из них быстро сосчитаются, и соответствующие им процессоры будут простаивать в ожидании, пока сосчитается самая длинная из цепочек. Если общее число цепочек окажется некратно числу процессоров, то на последнем шаге расчета часть процессоров будет простаивать. При отношении близком к единице эффективность алгоритма существенно упадет.

Исходя из вышесказанного, имеет смысл приводить все цепочки к одной длине. Исходно цепочки выбираются так, чтобы минимизировать число связей между ними, при этом все цепочки получаются различной длины. Однако метод прогонки, которым считается цепочка, допускает наличия нулей в недиагональных элементах, иными словами можно применить метод прогонки для СЛАУ с трех диагональной матрицей, составленной из нескольких цепочек. Таким образом, короткие цепочки объединять между собой, увеличивая длину

решаемой цепочки. При наличии слишком длинной цепочки ее можно поделить, введя дополнительную связь, однако при этом увеличится объем связей между цепочками.

Для эффективной работы данного метода, его базовые параметры, такие как длина цепочки, число добавляемых связей должны быть настроены под вычислительное устройство, на котором будет выполняться расчет. После этого исходная сеть должна быть разбита на цепочки узлов так, чтобы их длины мало отличались от заданной длины, а число связей между цепочками было минимально. В результате получатся набор трехдиагональных матриц. Только на этом этапе можно оценить, насколько эффективным окажется метод при расчете данной сети. Для автоматического выполнения этих подготовительных процедур потребуются специальные алгоритмы, отсутствующие на данный момент. Ручное разбиение сети может быть произведено на основе экспертных знаний о топологии конкретной сети. На основе ручного разбиения можно исследовать свойства приведенной методики расчета режима сети, однако для промышленного применения должны быть автоматизированы все этапы расчета.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная концепция метода параллельного расчета системы линейных уравнений, моделирующих электрическую сеть не имеет прямой зависимости между размером и топологией сети с одной стороны и параметрами параллельной вычислительной системы с другой. Отсутствие такой зависимости дает возможность создать метод, способный эффективно считать режим сети с количеством узлов на вычислительных системах с уровнем параллелизма порядка сотен потоков. Методика расчета в том виде, в котором она приведена в статье не учитывает наличие топологии внутри вычислителя и поэтому применима только к параллельным вычислителям с общей памятью. Поэтому вопрос о расчете режима электрической сети на суперкомпьютерах остается открытым. Однако вычислители с общей памятью (видеокарты) на сегодня составляют большой класс доступных к промышленному применению вычислительных систем с производительностью выше, чем у последовательного вычислителя (центрального процессора) примерно на два порядка. При появлении рабочей версии метода станет возможным существенное ускорение таких расчетных процедур как расчет шага переходного процесса. В этом случае централизованная противоаварийная автоматика следующего поколения, реализованная на видеокартах, будет иметь возможность расчета переходного режима с опережением его развития в электрической сети.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] TOP500 Statistics [Online] Available: <http://www.top500.org/stats>
- [2] Воеводин В.В., Воеводин Вл.В., Параллельные вычисления, СПб: БХВ-Петербург, 2002. стр. 198-219.
- [3] Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М., Неуймин В.Г., Расчетные модели потокораспределения электрических систем, Москва: Флинта, 2008. стр. 44-137.
- [4] Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений, Москва: Интернет университет информационных технологий, 2007. стр. 423.
- [5] N. I. M. Gould, Y. Hu, J. A. Scott, "A numerical evaluation of sparse direct solvers for the solution of large sparse, symmetric linear systems of equations", Computational Science and Engineering Department Atlas Centre Rutherford Appleton Laboratory Oxfordshire OX11 0QX April 25, 2005 [Online] Available: <http://www.clrc.ac.uk/Activity/ACTIVITY=Publications;SECTION=22>
- [6] G. Karypis V. Kumar. "A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs" SIAM Journal on Scientific Computing, Vol. 20, No. 1, pp. 359 - 392, 1999
- [7] METIS - Serial Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering [Online] Available: <http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/metis/overview>
- [8] K. Habgood, I. Arel "A condensation-based application of Cramer's rule for solving large-scale linear systems" Volume 10, January 2012, Pages 98–109 [Online] Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570866711000736# fg0010>

**Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем
01 – 05 июня 2015 г., Сочи**

- [9] Кирпикова И.Л., Кулешов А.И., Липес А.В., Неуймин В.Г. Алгоритм и программа оперативной оценки возможности отключения элементов основных сетей и межсистемных связей. // Советчики диспетчера по оперативной коррекции режимов работы ЭЭС. Иркутск: АН СССР, СЭИ, 1984.
- [10] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. -М.:Наука,1989.



С.3-8. Применение автоматизированного цифрового диагностического комплекса реального времени ЦДК-РТ

**А.А. ГОРЧАКОВ, В.Е. ИОНАЙТЕС, А.В. МАЙЗЕЛЬ,
М.Г. ПОПОВ, В.Н. РЯБОВ**

**ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский Государственный
Политехнический Университет»
Россия
amayzel@gmail.com**

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

математическая модель, НЛ, Hardware-In-the-Loop, система автоматического управления возбуждением, автоматизированный испытательный комплекс, тестирование.

1 ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается процесс и результаты внедрения цифрового диагностического комплекса программно-аппаратного моделирования ЦДК-РТ. Комплекс ЦДК-РТ разработан компанией «НПП «РТС-Электро» для проведения автоматизированных испытаний систем управления возбуждением дизель-генераторов АЭС. Промышленные образцы комплекса внедрены на ряде станций ОАО «Концерн Росэнергоатом» России, в частности Курская АЭС, Ленинградская АЭС. В настоящее время проводятся работы совместно с кафедрой «Электрические станции и автоматизация энергосистем» ФГАОУ ВО СПбПУ по расширению диапазона применения технологий реального времени для решения задач в энергетике и образовании (исследования систем РЗА, АСУ ТП и др.).

Традиционная методика испытаний систем режимной и противоаварийной автоматики энергосистем основана на применении электродинамических моделей, что связано с рядом неустраняемых ограничений. К таким ограничениям следует отнести как чисто технические (невозможность реализации аварийных режимов [1], так как имитация аварии на физических моделях объективно затруднена), так и организационные и экономические (длительность испытаний, высокие требования к квалификации персонала, существенные габариты и стоимость испытательного оборудования, его низкая универсальность).

На современном этапе развития информационно-вычислительной техники стало возможна не только цифровая (фактически, программно-аппаратную) реализация математических алгоритмов систем автоматического управления и защиты, но и создание систем имитации, построенных на аналогичных принципах.

Применение цифровых систем формирования сигналов тока и напряжения известно давно и показало свою востребованность на энергетическом рынке. Системы типа «Ретом» обладают возможностью программно задавать уровни токов и напряжений, подаваемых на входные терминалы испытываемого устройств, либо воспроизводить имеющиеся записи регистраторов аварийных процессов (цифровые осциллограммы). Это даёт широкие возможности по испытанию систем релейной защиты и автоматики, однако также обладает

рядом существенных недостатков. Во-первых, необходимо располагать COMTRADE-осциллограммой воспроизводимого аварийного процесса, что, по объективным причинам, доступно не всегда. Во-вторых, отсутствие цепи обратной связи не позволяет проводить полноценные испытания систем автоматического управления, так как исключает непосредственно объект управления из воспроизводимого процесса.

Именно включение в систему испытаний цепи обратной связи, и реализация объекта управления в виде математической модели, исполняемой в реальном масштабе времени, является наиболее перспективной и востребованной задачей в области развития испытательных средств. В Западной терминологии подобные системы называются аббревиатурой HIL (Hardware-In-the-Loop), а в русскоязычной – системы аппаратно-программного моделирования в замкнутом цикле, то есть с обратной связью.

Системы, производимые канадским разработчиком RTDS, представляют собой линейку аппаратно-программных имитаторов энергетического оборудования реального времени и систем согласования (преобразования) формируемых и измеряемых сигналов. Данные системы в их текущей реализации, однако, обладают объективным недостатком в части динамического диапазона усиленного сигнала, что не позволяет говорить о сохранении формы сигнала и использовании данных систем для решения задач испытания и диагностики систем.

Цифровой диагностический комплекс ЦДК-РТ построен на HIL-архитектуре и включает вычислитель реального времени, цифро-аналоговые преобразователи, усиливающие преобразователи напряжение-ток и напряжение-напряжение, измерительные (вторичные) преобразователи и блоки АЦП (Рис. 1). Данный комплекс прошёл успешное внедрение на Курской АЭС (2012 г.), Ленинградской АЭС (январь 2015 г.) для задач проведения плановых диагностических испытаний систем управления возбуждением резервных дизель-генераторов собственных нужд. Подробно архитектура, процесс и результаты внедрения ЦДК-РТ рассмотрены далее в данной статье.

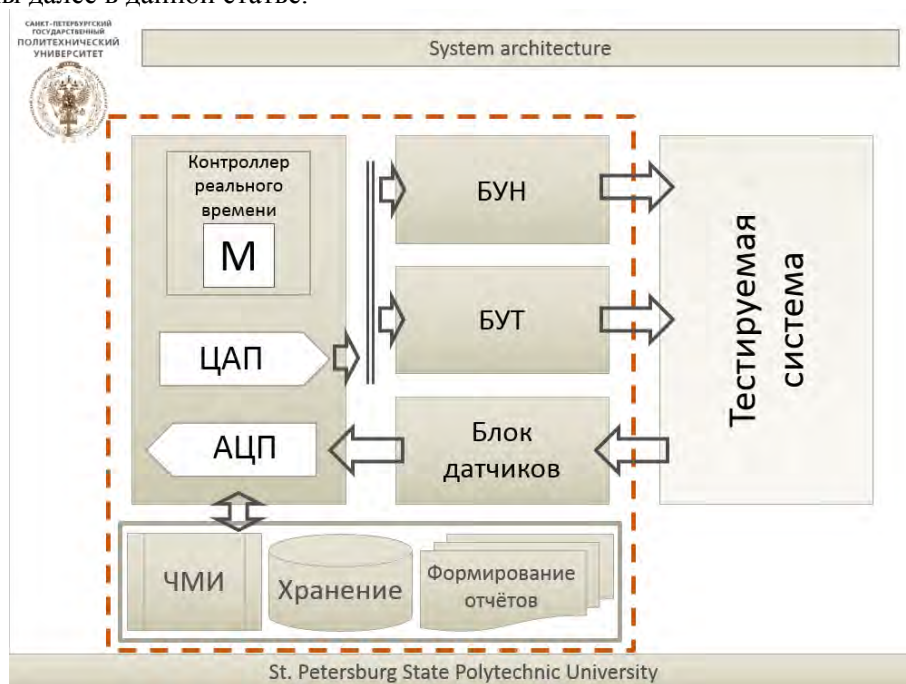


Рис. 1: Блок-схема ЦДК

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Архитектура ЦДК-РТ

В основе ЦДК-РТ лежит открытая модульная аппаратная платформа промышленного исполнения формата «Евромеханика», включающая шасси, управляющий контроллер, а также измерительные модули. Платформа управляется операционной системой реального времени

(Real-Time). Разработка специализированного прикладного программного обеспечения для встраивания в операционную систему осуществлялась с помощью среды визуального программирования. Открытость аппаратных и программных средств, применяемых в архитектуре комплекса, позволяет снизить зависимость от конкретных поставщиков комплектующих в условиях нестабильной внешнеэкономической ситуации.

Применяемая среда графической разработки позволила значительно упростить и ускорить процесс создания алгоритмов взаимодействия с ЦАП и АЦП, протоколов коммуникаций и задач регистрации осциллограмм процессов. Одновременно включение в программу модели объекта управления в виде динамической библиотеки позволило создать универсальную реконфигурируемую структуру программного обеспечения с возможностью простой замены модели на другую.

Конструктивно цифровой диагностический комплекс ЦДК-РТ смонтирован в 19-дюймовой стойке (Рис 2). Комплекс требует однофазного питания 220 В мощностью не более 3 кВт. Все подключения осуществляются через вводы в нижней части стойки. Для организации работ требуется рабочий стол оператора для размещения системы пользовательского ввода-вывода. Используются три выносных монитора. Один монитор отображает статусную информацию контроллера реального времени, и служит для визуальной диагностики функционирования системы. Два других монитора используются для реализации интерфейса автоматизированного рабочего места оператора: управления процессом испытаний и исследования зафиксированных осциллограмм. Для работы в комплекте поставляются проводные клавиатура и мышь.



Рис. 2: Внешний вид ЦДК в стойке

Применяемый в актуальной версии ЦДК контроллер реального времени располагает процессором Intel Core i7 с четырьмя физическими ядрами, реализующими восемь вычислительных потоков. Данный контроллер выполняет расчет математической модели испытуемой электроэнергетической системы и управляет модулями формирования испытательных сигналов, а также производит измерения сигналов обратной связи через цепи АЦП, реализует регистрацию осциллограмм, включая информационный обмен с пультом оператора. Как было отмечено выше, контроллер функционирует под управлением операционной системы реального времени, которая позволяет назначить критичному к длительности выполнения циклу наивысший системный приоритет и использовать микросекундный таймер для тактирования данного цикла. Это позволило реализовать детерминированное вычисление двухсот точек формируемого сигнала на период промышленной частоты.

Для цифро-аналогового преобразования применены универсальные модули ввода-вывода, с поддержкой программного драйвера, особенностью которого является поддержка жесткого аппаратного тактирования каналов ЦАП.

Для передачи формируемых сигналов на входные цепи испытываемого шкафа автоматического управления в составе ЦДК-РТ применены усилители класса «А» собственной разработки «РТС-Электро». Данные усилители реализуют преобразование напряжение-ток (БУТ – блок усилителей тока) и напряжение-напряжение (БУН – блок усилителей напряжения) с последующим масштабированием по уровню, при этом сохраняя форму исходного сигнала. Рабочий диапазон блоков усиления по току составляет 30 А, по напряжению 400 В.

Обратная связь в ЦДК-РТ реализована по цепи тока возбуждения, задаваемого испытываемой системой. Согласование сигнала организовано с использованием датчика Холла и преобразователя ток-напряжение (Блок датчиков). Используются АЦП, программируемые стандартным драйвером, что и модули ЦАП. Реализован обмен дискретными сигналами между ЦДК и испытываемой системой.

Пользовательский интерфейс пульта оператора реализован в операционной системе Windows 7 (Рис. 3). Управляющий компьютер с ОС Windows осуществляет информационный обмен с контроллером реального времени по проводному интерфейсу.

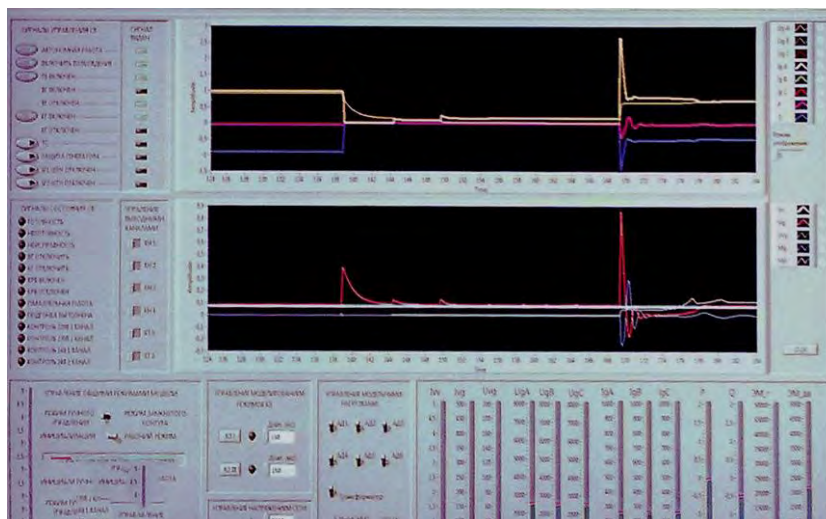


Рис. 3: Внешний вид ЧМИ АРМ оператора

Интерфейс оператора включает следующие функциональные блоки:

- передача и приём дискретных сигналов управления и индикации;
- управление режимом вычисления модели и контроля возбуждения;
- отображение фазных величин токов и напряжение, активной и реактивной мощностей в относительных единицах на графике во временной области;
- отображение параметров ротора: токов возбуждения генератора и возбудителя, механического и электромагнитного момента также на графике в о.е.;
- числовое отображение вышеуказанных параметров в именованных единицах;
- управление выключателями;
- имитация режимов короткого замыкания;
- управление регистрацией осциллограмм.

Второй компонент программного обеспечения ЦДК-РТ служит для работы с полученными осциллограммами: позволяет выполнять их изучение, сохранение в базу данных испытаний, а также реализует автоматическое формирование отчётов (Рис. 4).

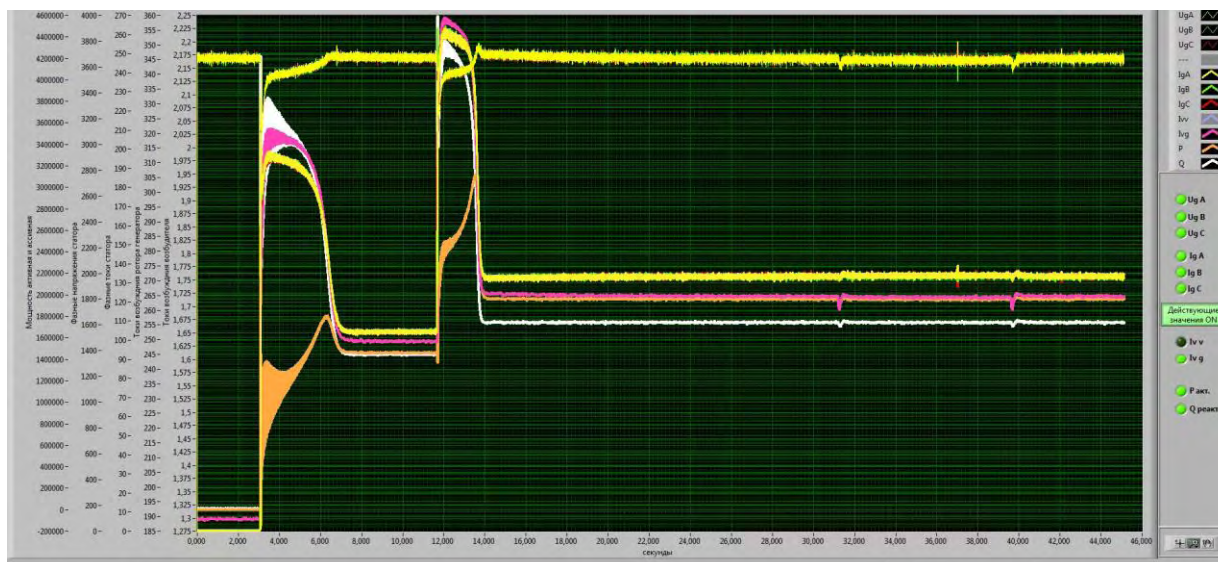


Рис. 4: Программное обеспечение просмотра и анализа цифровых осциллограмм

2.2 Внедрение ЦДК-РТ

Авторами статьи был произведён ряд модификация комплекса ЦДК-РТ, направленных на повышение стабильности работы и возможностей оператора по управлению тестовыми режимами.

С применением ЦДК-РТ авторами были проведены испытания шкафа типа КОСУР-271, выполняющего управление возбуждением резервного дизель-генератора собственных нужд Ленинградской АЭС. Электрическая схема, моделируемая в ходе испытаний приведена на Рис. 5.

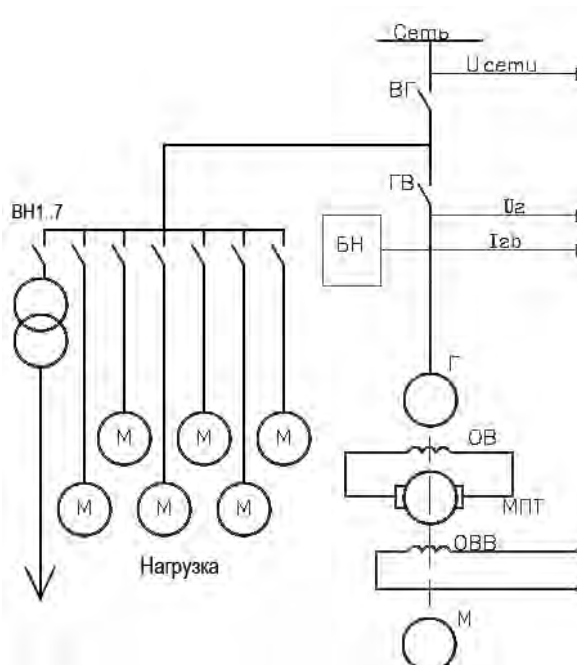


Рис. 5: Электрическая схема испытываемого объекта

Была выполнена программа испытаний в следующих режимах:

- пуск на холостой ход;
- работа на холостом ходу;
- режим каскадного пуска двигательной нагрузки (Рис. 4);
- установившийся режим работы под нагрузкой;
- включение в параллельную работу с системой с грубой (Рис. 3) и точной синхронизацией;
- время изменения тока возбуждения от минимального до максимального значения согласно ТУ;
- регулирование напряжения при изменении частоты в диапазоне 49..51 Гц;

Выше перечислены режимы, доступные для испытаний классической методикой с применением электродинамических моделей. Сопоставление результатов данных испытаний, полученных с использованием ЦДК и без, позволило сделать вывод об однозначной повторяемости и взаимном соответствии результатов. Кроме того были проведены испытания в режимах, недоступных с применением других методик, а именно в режимах однофазного и трёхфазного короткого замыкания на шинах собственных нужд.

Два комплекта ЦДК-РТ были поставлены заказчику на Ленинградскую АЭС. В ближайшее время будет проведено обучение персонала станции работе с комплексом и внедрение в эксплуатацию в программу испытаний систем возбуждения в рамках мероприятий планово-предупредительного ремонта.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Испытания комплекса ЦДК-РТ показали, что программно-аппаратные модели реального времени являются наиболее качественным и эффективным инструментом для исследования, проектирования и испытаний систем автоматического управления и защиты в энергетике. При этом данные системы позволяют провести комплексные испытания электрической схемы объекта, и дают возможность получить адекватные мгновенные значения параметров режимов работы в любой точке схем (расчётные осциллограммы): токов, напряжений, момента электромагнитного. Это позволяет уточнить целый ряд параметров режима работы отдельных составляющих элементов схемы (например, тепловая нагрузка электрических машин, величины крутильных колебаний в валопроводах агрегатов в аварийных режимах работы и т.п.) [2].

Результаты внедрения показали ряд положительных эффектов от применения аппаратно-программной модели вместо электродинамической, включая автоматизацию процесса испытаний, сокращение времени тестирования, снижение возможностей ошибочных действий персонала и ведение единой базы данных испытаний, а также ряд дополнительных преимуществ в виде меньших энергозатрат, высокой мобильности комплекса и даже возможность проведения испытаний в режиме удалённого доступа.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зеленин А.С., Кузнецов В.Л., Попов М.Г. Разработка микропроцессорного испытательно-диагностического комплекса средств релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ, СПб, 2012, С. 53-58
- [2] Рябов В.Н., Ванин В.К., Попов М.Г. и др. Цифровое моделирование электромеханических процессов в режимах реального времени. Внедрение в практику эксплуатации электрооборудования, Новости электротехники, 2012.№4