

**В.А. Крылов, Н.П. Романенко, Н.Ф. Колесникова,  
Е.И. Козлова, О.А. Литвинова, А.С. Свирид, Н.А. Бабич**

## **РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ С БМС ДЛЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ РАСЧЕТОВ НА ПЭВМ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ (И ИХ ПРИЛОЖЕНИЙ) В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ**

*Описано чергові програмні розробки, призначені для обслуговування базових математичних моделей, що використовуються при розрахунках різноманітних аварійних режимів (та пов'язаних із ними технологічних розрахунків) у складних електричних мережах по Програмному комплексу V-VI-50ПЗ*

Разработанный в ИЭД НАНУ Программный комплекс V-VI-50ПЗ реализует все предусмотренные в нем разнообразные технологические расчеты (токов КЗ, сложносимметричных режимов, эквивалентов, уставок типовых и микропроцессорных защит, мест повреждения ВЛ и др.) на основе сохраняемых на МД базовых информационно-математических моделей сложных и объемных электрических сетей (БМС) электроэнергетических систем и их объединений [1–3].

БМС учитывает необходимые в современной расчетной практике факторы: сложную взаимную индукцию, емкостную проводимость и шунтирующие реакторы ВЛ, различие ЭДС генераторов, действительные коэффициенты трансформаторов и АТ, комплексные (активно-реактивные) и нулевые сопротивления элементов электрической сети.

БМС содержит для каждой из последовательностей, прямой и нулевой: обозначения ветвей (номера соединяемых ими узлов, а в случае задания – также номера параллельности ветвей) и имеющиеся у ветвей параметры (продольные и поперечные проводимости, ЭДС, коэффициенты трансформации), далее – преобразованную по Гауссу (треугольную) матрицу узловых проводимостей (ее ненулевые элементы), а для прямой последовательности – также узловые напряжения исходного (доаварийного) режима – и общую для обеих последовательностей БМН – базовую модель характеристик («наименований») узлов (их номера, типы и названия).

С целью оптимизации затрат машинного времени при операциях с указанными выше компонентами БМС (в ходе выполнения на ее основе требуемых технологических расчетов), для каждого из этих компонентов при построении БМС формируется соответствующая специализированная информационно-поисковая система, входящая в состав БМС и содержащая необходимые адресные отображения и характеристики информационных массивов, обеспечивающие желаемую оптимизацию.

В составе Программного комплекса V-VI-50ПЗ имеются специализированные программные средства обслуживания БМС [1–3], позволяющие: изначально формировать БМС на МД (исходя из перечней ветвей и узлов расчетной схемы электрической сети); перестраивать (корректировать) БМС на МД в соответствии с коммутациями ветвей и узлов (в «радикальных» подрежимах, отражающих устойчивые изменения и желаемые состояния электрической сети и расчетной схемы); размножать БМС на МД, выдавать по ней необходимую справочную информацию (в частности – характеристики ветвей и узлов БМС, количественные параметры прямой и нулевой последовательностей) и др.

Перечень коммутаций БМС, предусмотренных в «радикальных» подрежимах: подключения ветвей, отключения ветвей (с обеих сторон и с одной стороны), отключения и заземления ветвей (с обеих сторон и с одной стороны), изменения параметров ветвей (обозначений, продольных собственных и взаимных сопротивлений и поперечных проводимостей, ЭДС, коэффициентов трансформации); присвоение узлам в БМН желаемых характеристик (типов и названий), устранение и изменение характеристик узлов.

Перечисленные коммутации носят универсальный характер в части типов охватываемых элементов (ветвей и узлов), своих функциональных возможностей, способов задания и реализации и имеют широкие области целесообразного применения, начиная с реализации в БМС собственно изменения состояния электрической сети, далее – учета (или изменения) в БМС первоначально незаданных (или заданных недостаточно полно) параметров электрической сети и вплоть до создания на МД проблемно-ориентированных БМС специального назначения [3].

В контексте дальнейшего совершенствования Программного комплекса V-VI-50ПЗ, с целью расширения его функциональных возможностей и минимизации затрат ручного труда на подготовку исходной информации для технологических расчетов, получили развитие также и рассматриваемые программные средства обслуживания БМС. Сказанное относится и к перечню трехфазных коммутаций «радикальных» подрежимов: в дополнение к указанным выше в него добавлена трехфазная коммутация – «Введение у ветвей в БМС промежуточных узлов».

Эта коммутация предполагает фиксацию в БМС ранее отсутствовавших промежуточных узлов у ветвей, замещающих в БМС соответствующие ВЛ электрической сети (или их «коридоры»), на которых необходимо в явном виде указать соответствующие стационарные промежуточные точки.

Данная операция может потребоваться при учете в БМС фактических (или предполагаемых в случае проведения расчетов на перспективу) изменений конфигурации ВЛ в связи, например, с сооружением на ВЛ разного рода отпаечных и транзитных подстанций (в том числе – при реализации заходов ВЛ на функционирующие подстанции), далее – при корректном учете в БМС новых ВЛ, трассируемых на участках параллельно имеющимся ВЛ вблизи последних, когда, помимо собственно введения в БМС этих новых ВЛ, на имеющихся ВЛ необходимо обозначить в БМС «коридоры» их индуктивной магнитной связи с новыми ВЛ и др.

Настоящая коммутация содержит в «радикальном» подрежиме записи обозначений коммутируемых ветвей, номера их промежуточных узлов и константы координат последних – относительных расстояний от узлов коммутируемых ветвей, указанных в их обозначениях первыми.

При реализации данной коммутации каждая заданная коммутируемая ветвь поочередно автоматически устраняется из таблиц ветвей БМС и вместо нее добавляются две новые ветви с их обозначениями, автоматически формируемыми исходя из номеров узлов коммутируемой ветви и номера промежуточного узла, и параметрами (продольными сопротивлениями и поперечными проводимостями прямой и нулевой последовательностей), автоматически вычисляемыми пропорционально соответствующим параметрам коммутируемой ветви. После этого БМС автоматически перестраивается в соответствии со скорректированными описанным образом таблицами ветвей каждой из последовательностей.

Характеристики вводимых промежуточных узлов (тип и название) кодируются и учитываются в БМС (БМН) в «радикальных» подрежимах самостоятельными коммутациями обычного вида.

Значения расстояний промежуточных узлов в рассматриваемой коммутации могут задаваться любыми требуемыми величинами в диапазоне от 0 до 1.

С целью повышения универсализации в настоящей коммутации предусмотрена возможность введения у коммутируемых ветвей как одного, так и сразу пары расположенных рядом промежуточных узлов. В последнем случае каждая коммутируемая ветвь автоматически заменяется в БМС тремя ветвями, в том числе – ветвью нулевого сопротивления между собственно промежуточными узлами.

Для группы индуктивно связанных между собой в нулевой последовательности ветвей (могущих иметь также и поперечные проводимости) рассматриваемая коммутация предполагает введение в «радикальном» подрежиме в БМС промежуточных узлов сразу у всех ветвей группы с единой константой координаты этих узлов (относительного расстояния от

первых узлов обозначений ветвей). При этом для любых (и в том числе всех) этих ветвей по желанию может вводиться сразу пара промежуточных узлов.

В заключение рассмотрения настоящей коммутации «радикального» подрежима отметим, что она является дополнением к важнейшей функции большинства технологических программ Программного комплекса V-VI-50ПЗ, реализующей автоматические расчеты КЗ вдоль ВЛ в отсутствующих в БМС «плавающих» промежуточных точках с поочередным вычислением для этого при их автоматических перемещениях параметров (узловых сопротивлений и доаварийных напряжений) этих точек в «оперативных» подрежимах технологических программ на основе автоматически сформированных расчетных математических моделей частей районов электрической сети – РМЧР, соответствующих этим «оперативным» подрежимам [4].

Описанная коммутация «радикального» подрежима создает условия для корректной реализации указанной функции, минимизируя при задании этой коммутации трудозатраты и вероятность допущения ошибок.

В программном обеспечении обслуживания БМС ранее была реализована также возможность автоматизированного попарного сопоставления (в специальных подрежимах) сохраняемых на МД БМС – с выдачей топологических и параметрических различий между собой каждой из последовательностей и БМН этих БМС, что позволяло автоматизированным образом достаточно полно идентифицировать данные БМС в части выявления их сравнительных особенностей.

В дальнейшем соответствующие программные модули были адаптированы и непосредственно к «радикальным» подрежимам, что обеспечило автоматическое сравнение между собой исходной и скорректированной БМС с существенным повышением в едином технологическом цикле визуализации изменений БМС, обусловленных коммутациями этих «радикальных» подрежимов.

Продолжением работ в данном направлении в настоящее время стала реализация автоматизированного сравнения между собой компонентов конкретной БМС – ее прямой последовательности, нулевой последовательности и БМН.

Проведение такого сравнения весьма желательно при ревизии состояния рассматриваемой БМС и выявлении имеющихся различий у ее компонентов, естественных ожидаемых, которые могут и должны сохраняться в БМС, и тех, которые целесообразно и даже необходимо из БМС устранить во избежание ошибок при проведении на ее основе текущих технологических расчетов. К последнему относится такое явление, как неадекватное представление элементов расчетной схемы электрической сети, которые должны фигурировать в каждой из последовательностей БМС в явном виде: отсутствие соответствующих узлов и ветвей в какой-либо из последовательностей (и наоборот – присутствие соответствующих узлов и ветвей в одной из последовательностей, которых в ней не должно быть); запись обозначений ветвей, представляющих один и тот же элемент, наоборот, в каждой из последовательностей; существенное различие коэффициентов трансформации у ветвей в прямой и нулевой последовательностях, замещающих одни и те же трансформаторы и АТ (кроме ситуаций с заземляющими реакторами и резисторами в нейтрали АТ); запись одинаковым обозначением и номером параллельности ветвей, замещающих разные элементы расчетной схемы (например, блочный генератор в прямой последовательности и имитирующий заземление нейтрали соответствующего блочного трансформатора ветвь нулевого сопротивления на землю в нулевой последовательности).

При описываемом сравнении автоматически регистрируются и многие другие различия компонентов БМС, которые, как указывалось выше, могут (а в некоторых случаях даже должны) иметь место, например: отсутствие в нулевой последовательности ветвей, замещающих реальные генераторы, далее – большинства узлов и ветвей ТЭЦ и сетевых подстанций на напряжении 35 кВ и ниже, некоторых продольных ветвей эквивалентных схем замещения соседних электроэнергетических систем; отсутствие в прямой последовательности ветвей нулевого сопротивления на землю, имитирующих заземление нейтралей трансформа-

торов, и некоторых поперечных ветвей эквивалентных схем замещения соседних электроэнергетических систем; различие сопротивлений продольных ветвей (с трансформацией) эквивалентных схем замещения соседних электроэнергетических систем, фигурирующих в обеих последовательностях БМС (сравнение продольных сопротивлений и поперечных проводимостей прямой и нулевой последовательностей у ветвей, замещающих ВЛ, в силу их априорного различия не производится).

Точно так же при сравнении компонентов БМС фиксируется отсутствие в БМН узлов, имеющих в прямой и нулевой последовательностях БМС, и наоборот. Первое может ухудшить коммутарийность результатов некоторых видов расчетов (эквивалентирования, токов КЗ в узлах) и оказаться недопустимым при расчетах уставок защит по условиям согласования с защитами смежных присоединений. Второе чревато несоответствию БМН расширяющимся в дальнейшем прямой и нулевой последовательностям БМС с последствиями, указанными выше для первой ситуации.

Все недопустимые и нежелательные несоответствия компонентов рассматриваемой БМС, установленные при их автоматическом сравнении, должны быть далее устранены в соответствующих «радикальных» подрежимах с помощью указанных выше предусмотренных для них коммутаций подключения и отключения ветвей и узлов и изменения их характеристик.

Для облегчения выравнивания обозначений ветвей, записанных в прямой и нулевой последовательностях рассматриваемой БМС наоборот, в настоящее время в составе программного обеспечения обслуживания БМС разработаны программные средства, реализующие специальный «радикальный» подрежим, выполняющий требуемое автоматическое подравнивание обозначений ветвей в нулевой последовательности (без задания каких-либо коммутаций) обозначениям соответствующих ветвей в прямой последовательности БМС (с автоматическим изменением знаков взаимных сопротивлений этих ветвей в нулевой последовательности при наличии у них в данной последовательности взаимной индукции).

Этот «радикальный» подрежим минимизирует трудозатраты на подготовку соответствующей исходной информации и исключает возможность ошибок, которые могли быть допущены при выравнивании обозначений ветвей в обеих последовательностях БМС без его использования.

Многолетняя практика систематических расчетов аварийных режимов в сложных электрических сетях электроэнергетических систем и их объединений показала целесообразность реализации исходного (доаварийного) режима БМС (по активным параметрам), близким к режиму холостого хода, с его напряжениями в узлах, близкими к их среднономинальным напряжениям, и вынесения учета требуемого нагрузочного режима (и электромеханического переходного процесса) элементов электрической сети в специализированные коммутации «оперативных» подрежимов и соответствующие последним локальные расчетные математические модели частей районов электрической сети (РМЧР) – уже при непосредственном проведении на основе БМС конкретных уточненных расчетов аварийных режимов [4].

С целью облегчения идентификации исходного режима БМС в имеющейся в составе Программного комплекса V-VI-50ПЗ программе автоматизированных расчетов токов КЗ в узлах [3], в дополнение к ее проблемно-ориентированным вычислительным функциям и соответствующим формам выдачи результатов, реализованы автоматизированные вычисления доаварийных токов всех генераторных ветвей БМС и доаварийных напряжений узлов их присоединений, а также для заданных узлов (и их интервалов) – расчеты доаварийных напряжений этих узлов и доаварийных токов примыкающих к ним ветвей.

С помощью этой расчетной информации может быть оценена степень разбалансированности исходного режима БМС и установлены источники его небалансов.

Если эти небалансы (значения доаварийных токов в ветвях и отличия доаварийных напряжений в узлах от их среднономинальных значений) существенны, они могут быть минимизированы с помощью соответствующих коммутаций изменения ЭДС генераторов и коэффициен-

тов трансформации трансформаторов и АТ в «оперативных» подрежимах данной технологической программы.

По получению положительных результатов этой балансировки можно в завершающем «оперативном» подрежиме данной программы выполнить расчеты токов КЗ во всех узлах с выдачей результатов лишь по месту КЗ, содержащих доаварийные напряжения узлов, и, в случае удовлетворительных значений последних, перенести коммутации этого подрежима в «радикальный» подрежим корректировки БМС и реализовать его. При этом также будут автоматически выводиться доаварийные напряжения узлов, что лишний раз подтвердит корректность выполненной балансировки.

В заключение отметим, что все описанные разработки в Программном комплексе V-VI-50ПЗ для обслуживания БМС в настоящее время проходят опытно-промышленную апробацию, а программные средства автоматического сравнения компонентов БМС и выравнивания обозначений ветвей в прямой и нулевой последовательностях БМС внедрены в промышленную эксплуатацию.

*Описаны очередные программные разработки, предназначенные для обслуживания базовых математических моделей, используемых при расчетах различных аварийных режимов (и связанных с ними технологических расчетов) в сложных электрических сетях по Программному комплексу V-VI-50ПЗ.*

*It is described the next program treatments, that are given for serving the base mathematical models, which using for calculations of different faults (and those technological calculations, that are tied with it) at complicated electrical networks by means of Complex software V-VI-50P3.*

1. Крылов В.А. и др. Программный комплекс V-VI-50ПЗ автоматизированных расчетов на ПЭВМ аварийных режимов и уставок РЗ в сложных электрических сетях // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2005. – № 2(11). – Ч.1. – С.17–18.
2. Крылов В.А. и др. Комплексное программное обеспечение (V-VI-50ПЗ) автоматизированных расчетов на ПЭВМ аварийных режимов и уставок РЗ в сложных электрических сетях // Техн.електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 8. – С. 9–10.
3. Крылов В.А. и др. Программные средства корректировки базовых информационно-математических моделей электрической сети, расчетов токов КЗ в узлах и уставок защит в МП устройствах 7SA513 // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2006. – № 2(14). – С. 19–22.
4. Крылов В.А. Модели, методы и программные средства для расчетов и анализа нормальных и аварийных режимов ЭЭС // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2007. – Вип. 18. – С.19–26.

Надійшла 13.10.2009