



PS2 – S8-02



Оценка динамической устойчивости сетей – классификация нештатных ситуаций в системах

Э. ЛЕРХ, К.О. ХАЙДЕ, Р. КРЕБС, О. РЮХЛЕ

Siemens AG

Germany

edwin.lerch@siemens.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Характеристики работы системы, динамическая устойчивость, визуализация, показатели работы системы.

АННОТАЦИЯ

Рост и нагрузки современных энергосистем нуждаются в более продуманных инструментах контроля устойчивости системы, которые могут использоваться для поиска средств против снижения устойчивости и стабильности систем. При изучении устойчивости системы используется анализ напряжения системы, а также анализ стабильности сигналов при переходных процессах и анализ слабых сигналов. В статье приводится информация о ряде показателей поведения всей системы полностью с классификацией поведения меньших систем, а также о показателях стабильности при переходных процессах и поведения напряжения и производительности системы с использованием нечеткой логики для контроля состояния системы. Также сюда включена информация о показателях для контроля нагрузки каждого узла системы и аппроксимации мощности распада энергосистемы. Такие показатели позволяют определять абсолютную нагрузку узлов и состояние их напряжения. С помощью этих показателей можно проанализировать и проконтролировать приемлемым способом фактическую ситуацию – увеличение нагрузки и состояние напряжения узла за период времени - что отражает тенденцию развития поведения системы.

1 ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий было разработано множество методов и инструментов быстрого (в режиме реального времени) анализа энергосистем. Однако, несмотря на проведенные интенсивные исследования, большинство из них едва ли могут быть перенесены из научно-исследовательских лабораторий в мир промышленности, и значительное большинство сегодняшних диспетчерских центров фактически не может воспользоваться каким-либо программным продуктом для обеспечения устойчивости в реальном времени [1]. Тем не менее, увеличивающееся число чрезвычайных ситуаций, которые привели к отказам больших систем или даже к аварийным отключениям энергосистем (так называемым блэкаутам), вынудило некоторых операторов энергосистем пересмотреть используемые стратегии управления с целью определить пределы устойчивости вверенных им систем и выявить те методы и инструменты, которые помогли бы им в идентификации фактических пределов системы при ее эксплуатации.

Без сомнения, достижение этих целей требует значительных вычислительных и исследовательских усилий. В вычислениях необходимо рассматривать аспекты, касающиеся

различных форм устойчивости, в большинстве случаев рассматриваются аспекты устойчивости напряжения, частоты, слабых сигналов и сигналов в переходных режимах. При рассмотрении этих аспектов могут быть определены характеристики работы системы в целом; зная характеристики работы всей системы, оператор может формировать мнение о серьезности каждой конкретной ситуации и оценивать объем корректирующих действий по ее исправлению. При этом сбор информации относительно устойчивости системы может оказаться трудоёмким процессом, так как он предусматривает индивидуальное рассмотрение аспектов устойчивости. Поэтому в исключительных случаях, например, при наличии серьезных ограничений времени, было бы полезно иметь своего рода методологию поддержки, облегчающую данный процесс.

В настоящее время нет никакой получившей широкое применение методологии решения этой проблемы. Существует много методов оценки с привязкой к физическим аспектам, но при этом имеется всего несколько структур-оболочек для компоновки результатов оценки в форме индикатора полной устойчивости. В этой статье обсуждается понятие оценки устойчивости относительно этого вопроса. Данное понятие было успешно введено в тщательно разработанную область моделирования, и при корректной визуализации оно предоставляет многообещающее решение для быстрого проведения исследований динамической устойчивости.

2 ТИПОВЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

Основные компоненты структуры оценки устойчивости представлены на рис. 1. Система оценки устойчивости осуществляет измерения фактического состояния системы и выполняет анализ устойчивости в (практически) реальном времени, а затем передает информацию оператору или непосредственно в АСУ ТП. Основные функции каждого компонента подробно описаны в [2].

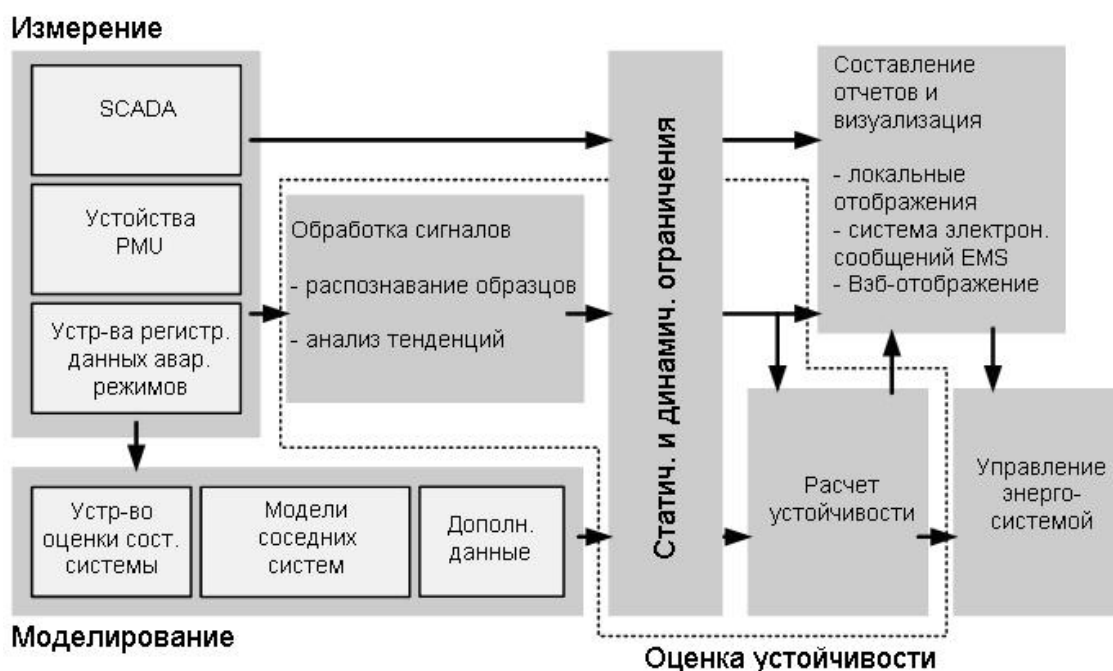


Рис. 1: Компоненты онлайн-системы оценки устойчивости

Здесь структуру рассматривают только с точки зрения процесса оценки устойчивости. Интерес представляют типовые требования, которые необходимо принимать во внимание при реализации такого процесса в существующей среде, определяемой источниками данных, такими как устройство оценки состояния системы, система сбора параметров векторов (PMU) и система SCADA с одной стороны и средствами управления системой с другой. В частности, общим требованиям, выдвинутым операторами Австралийской Национальной компанией по

управлению рынком электроэнергии (NEMMSO), Энергетического управления Лонг-Айленда (LIPA), Независимого системного оператора в Боснии и Герцеговине (NOS-BiH) и Национального бюро электроэнергии Марокко (ONE), которые приведены в [3]-[5] соответственно, было уделено особое внимание. Ниже приведен свод этих требований.

2.1 Технология расчета

В случае компании NEMMSO [3] операторы довольно консервативны в выборе методов вычисления и инструментов вычисления устойчивости. Они предпочитают придерживаться хорошо обоснованных решений, в особенности тех, с которыми они знакомы и которые широко применяются другими операторами и в связанных отраслях промышленности.

Технологией, обеспечивающей достаточный уровень надежности, является обычное моделирование во времени. Оно является одним из главных инструментов планирования сети и исследования функционирования системы. Этот метод является точным и имеет превосходные возможности для моделирования. Траектории системы вычисляются путем пошагового интегрирования дифференциальных уравнений системы, здесь возможно решение проблемы выполнимости и стабильности системы. Более того, данный метод также совместим с другими расчетными областями. Например, гибридные непосредственные методы представления во времени используются для объединения функциональных возможностей обоих методов, методы представления во временной области и непосредственные методы, а также другие методы для расширения возможностей. И последнее, хотя и не менее важное: стоимость компьютеров и технологии для легких параллельных вычислений вызывает необходимость создавать более или менее прозрачные алгоритмы вычислений с целью реализовать моделирование во временной области в реальном времени - даже для крупномасштабных сетей.

2.2 Аспекты устойчивости, ограничения и анализ

Операторы системы несут ответственность за безопасную работу системы согласно правилам сетевых стандартов; правила зависят от ограничений в форме равенства (поток мощности) и неравенства (пределы переменных), величин ограничения системы в устойчивом состоянии или после аномального режима или нештатной ситуации. При анализе устойчивости $N-1$, напряжения, сигналов при переходных режимах и слабых сигналах, а также устойчивость частоты, обычно оцениваются относительно этих ограничений. Вычисления выполняются офлайн и/или онлайн, а полученные предельные величины применяются при принятии решений по управлению системой с целью обеспечить ее надежную работу.

Устойчивость $N-1$ зависит от перетоков мощности, протекающей через ветви системы. Она дает пределы для потоков МВт в ветвях относительно их стойкости по нагреву и требуемого системой запаса передачи, для того, чтобы гарантировать бесперебойность поставки электроэнергии в случае отключений коридора или линии. Ограничения до пределов послеаварийного протекания через ветви обычно формулируются в режиме офлайн путем выполнения вычислений распределения нагрузки. В режиме онлайн они могут быть пересчитаны и применены в системе рыночного распределения электроэнергии, таким образом, соответствующие пределы будут введены относительно фактического протекания мощности в ветвях.

Устойчивость напряжения зависит от стабильности напряжения и влияет на способность энергосистемы поддерживать установившиеся напряжения на всех шинах при нормальной работе системы, а также после выхода из аномальных режимов. Пределы устойчивости установившихся и переходных режимов обычно формируются с рассмотрением устойчивости напряжения. Для предела устойчивости установившегося режима имеется диапазон допустимых отклонений напряжения при нормальной работе системы, в то время как для предела устойчивости переходного режима существуют требования по поддержанию непрерывного питания в случае повреждений. Пределы обоих типов обычно рассчитываются в режиме офлайн. В активном режиме (онлайн) они используются для ограничения напряжения.

Устойчивость при переходных процессах зависит от решения проблемы стабильности энергосистемы в переходных режимах. Проблема связана с синхронностью работы генераторов системы; если после повреждения угол генератора превышает определенное предельное значение, синхронизм теряется, и возникают условия неустойчивости. При определении устойчивости энергосистемы в переходном режиме операторы должны учитывать адекватность

модели и объем вычислений. Так как к непосредственным методам относятся все еще с подозрением, в значительной степени из-за важности действия предельных величин АСУ ТП и других нелинейных характеристик в вычислениях, для этой цели преимущественно используются методы моделирования во временной области. Основной целью исследований устойчивости в переходных режимах является определение критического времени устранения повреждения и пределы неустойчивости.

Устойчивость слабых сигналов зависит от того, реализуется ли в энергосистеме достаточное демпфирование колебаний, вызванных аномальным режимом, до их затухания; если демпфирование недостаточно, могут возникать проблемы устойчивости всей системы. Чтобы облегчить решение этих проблем в режиме онлайн, операторы все более охотно применяют инструменты расчета демпфирования в реальном времени. Такие инструменты имеют функцию немедленного расчета демпфирования. После определения достаточно низкой степени в систему управления вводятся ограничения по устойчивости с целью ограничить передачу электроэнергии через проблемные интерфейсы. При реализации ограничений по устойчивости операторы опираются на исследования в режиме оффлайн.

Устойчивость частоты зависит от того, имеется ли в энергосистеме горячий резерв, достаточный для поддержания частоты системы в пределах стандартов частоты в случае небаланса между генерированием и нагрузкой в системе. Для поддержания стабильной частоты операторы используют вспомогательные сервисы различных характеристик и величин: первичное и вторичное управление частотой, сброс нагрузки и т.д. Применение этих сервисов зависит от правил сетевых стандартов. Пределы запуска таких сервисов рассчитываются в режиме офлайн и с учетом допустимых отклонений частоты, которые не приведут к нежелательным последствиям для потребителей данной сети. Как правило, в рамках анализа устойчивости производится оценка градиента частоты, величин ее максимального снижения и отклонения в установившемся после нештатной ситуации режиме.

2.3 Вероятные нештатные ситуации

Обычно состояние энергосистемы определяется на основе ее способности выполнять свою функцию в условиях нештатных ситуаций различного уровня. Надежный способ определить воздействие нештатных ситуаций на работу системы состоит в том, чтобы выполнить анализ нештатной ситуации. На сегодняшний день практика выполнения такого анализа состоит из двух фаз: скрининг нештатной ситуации и ее оценка (ранжирование). Фаза скрининга нештатной ситуации обычно осуществляется в режиме офлайн и проводится с целью свести многие возможные нештатные ситуации к самым вероятным; при этом формируется список потенциально опасных ситуаций, которые вероятнее всего могут произойти и которые вызовут нарушения устойчивости. В фазе оценки нештатной ситуации выполняется полный анализ этих вероятных нештатных ситуаций.

При функционировании системы анализ вероятных нештатных ситуаций помогает операторам управлять системой в безопасном операционном режиме. Они исследуются в режиме онлайн на периодической основе или после изменения в работе системы; также распространены проверки «на сутки вперед». Окончательный список нештатных ситуаций, которые необходимо проверить, зависит от состояния системы и опыта оператора. Как правило, необходимо проверять те ситуации, которые ведут к отключению единичного энергообъекта или комплексного энергообъекта по причине замыкания фаз на землю или при других неблагоприятных событиях.

2.4 Требования к характеристикам работы

Оценка устойчивости в режиме онлайн служит для определения состояния энергосистемы при ее функционировании. Оценка вероятных нештатных ситуаций производится после изменений системы, периодически или по требованию. Используемые операторами уставки времени [3] - [5] следующие: анализ нештатных ситуаций и анализ короткого замыкания выполняются каждые 5 минут, расчет стабильности переходных режимов – каждые 2-3 минуты, устойчивость $N-1$ исследуют в 5-минутном цикле, и каждый раз, когда становится возможной оценка фактического состояния, производится расчет устойчивости напряжения.

2.5 Интегрирование в систему управления

Процедура оценки устойчивости может быть интегрирована в среду управления разными способами. Обычно она добавляется в существующую архитектуру SCADA/EMS в виде модулей, которые совместимы с другими интегрированными подсистемами. Свободное решение, которое было также принято компанией ONE (Марокко), показано на рис. 2. Это решение требует минимального количества регулировок структуры и позволяет выполнять интегрирование любого количества подпроцессов. Например, система SINAUT Spectrum SCADA/EMS, установленная в АСУ ТП компании ONE, не содержала модуля оценки стабильности в переходных режимах (TSA). Эти недостающие функциональные возможности были недавно введены в существующую конфигурацию путем установки рабочей станции на базе ПК, управляющего модулем TSA на основе снимка данных, получаемого от модуля оценки состояния системы. Очевидно, что та же концепция может использоваться при интегрировании многопроцессорных стратегий вычисления.

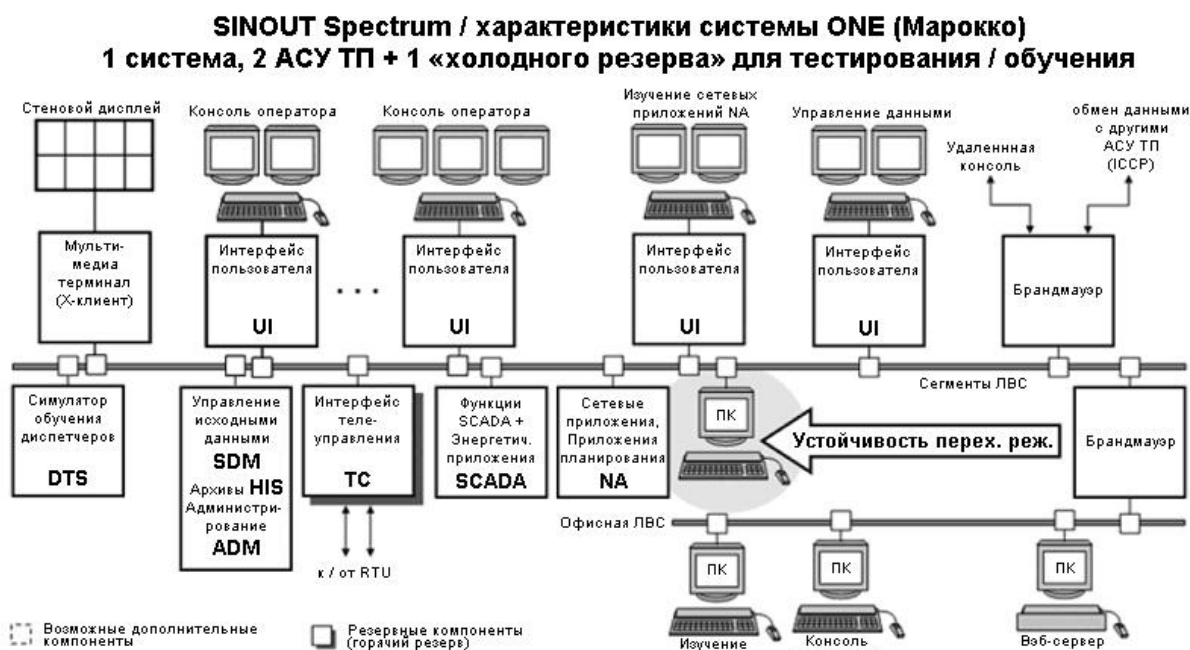


Рис. 2: Концептуальная схема конфигурации системы
Национального центра управления компании ONE (см. [5])

2.6 Визуализация устойчивости системы

При визуализации устойчивости энергосистемы важно отображать ключевую информацию. Это подразумевает использование различных методов визуализации, которые могут быть разбиты на два основных класса: общие методы - методы визуализации в виде двумерных схем и графиков различных видов – и расширенные методы – методы анимированного двух- и трехмерного отображения.

Качественная визуализация улучшает эффективность реакции оператора на проблемы энергосистемы. Такая визуализация полезна с точки зрения привлечения внимания к специфическим элементам или проблемным областям, а также для отображения данных о напряжении на шинах и о протекании мощности по линии передачи / через трансформаторе. Предпочтительно было бы иметь такие функциональные возможности визуализации, которые включают отображение состояния устойчивости системы полностью, отображение уровней серьезности нештатных ситуаций в терминах нарушений предельных величин, а также географической связи между нарушенными элементами и аварийными элементами.

Операторы знают о том, что комплексная визуализация может играть решающую роль в сокращении риска возможных отключений (блэкаутов). Ясное и информативное графическое представление состояния системы может помочь им быстро оценить потенциально быстро изменяющееся состояние системы и сформировать корректирующие управляющие воздействия.

3 ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ

Чтобы выполнить некоторые из требований, приведенных в предыдущем разделе, и совместить академические идеи и запросы «реального мира», было реализовано динамическое решение вывода устойчивости полностью на базе обычного моделирования во временной области. Цель процесса вывода состоит в том, чтобы собрать информацию относительно поведения системы и полностью сформулировать ее рабочие характеристики посредством полного индикатора устойчивости.

Оценка динамической устойчивости энергосистемы использует данные анализа динамического поведения системы под влиянием ряда вероятных нештатных ситуаций для диапазона выполняемых эксплуатационных режимов.

Очевидно, устойчивость системы может быть оценена относительно различных критериев: физические пределы системы, операционные ограничения, пользовательские критерии и т.д. Но на практике разумно выполнять оценку согласно правилам сетевых стандартов и абсолютных пределов стабильности; при использовании такого подхода легко может быть выведено общее впечатление о рабочих характеристиках системы при нештатных ситуациях различных уровней.

Рассматривая правила сетевых стандартов и абсолютные пределы стабильности несколько с другого угла зрения, можно увидеть, что для оценки, помимо обычного детерминированного подхода возможен еще и подход с учетом отношений между фактическими значениями и предельными значениями системных величин (переменных); обычный детерминированный подход дает ответ на вопрос, нарушены ли предельные величины системы или нет, что может быть представлено соответственно логическими значениями 0 или 1; в то время как основанный на относительном формулировании подход дает относительное расстояние до пределов в диапазоне величин от 0 до 1, где 0 обозначает полное соответствие пределам, 1 – их нарушение, а величины между 0 и 1 представляют изменения рабочих характеристик системы.

Полученные отношения далее в статье будут называться показателями работы системы; поскольку их алгоритмическое и теоретическое определение дано в полной мере в [6] – [8], цитирование их в рамках этой статьи преднамеренно опущено; но читателям настоятельно рекомендуется рассмотреть указанные ссылки с целью досконального изучения обсуждаемого здесь подхода.

Данные индексы были успешно включены в PSS®NETOMAC, который является грамотно реализованным устройством моделирования во времени. Здесь требуются три независимых цикла вычисления. В первом цикле выводится показатель допустимого отклонения энергии (см. [6]). Он вычисляется путем моделирования в сети трехфазного повреждения определенной продолжительности и представляет собой предельное значение энергии переходного процесса, которую система в состоянии принять без перехода в нестабильное состояние. Второй цикл моделирования используется для расчета показателя стабильности слабого сигнала (см. [7]). Показатель представляет собой степень восприимчивости сети к возмущениям после повреждения и отображает достаточность демпфирования вызванных возмущениями низкочастотных колебаний или его недостаточность. В третьем цикле моделирования определяются динамические характеристики работы системы при ее переходе из состояния до повреждения в состояние после повреждения. Это выполняется путем вычисления аналитических выражений, предложенных в [8]. Определяют количественно: напряжение, частоту и динамику генератора, а также значения некоторых величин системы в установившемся после повреждения режиме.

Упрощенная стратегия вычислений представлена на рис. 3. Она предназначена для вычислений одним процессором. В дополнение к алгоритму моделирования имеются другие основные компоненты – модуль построения нештатной ситуации, который дает возможность формировать нештатные ситуации и сценарии, систему вывода устойчивости и модуль графического представления для выдачи результатов. Очевидно, что алгоритм работает последовательно, выполняя расчет исследуемых ситуаций один за другим.

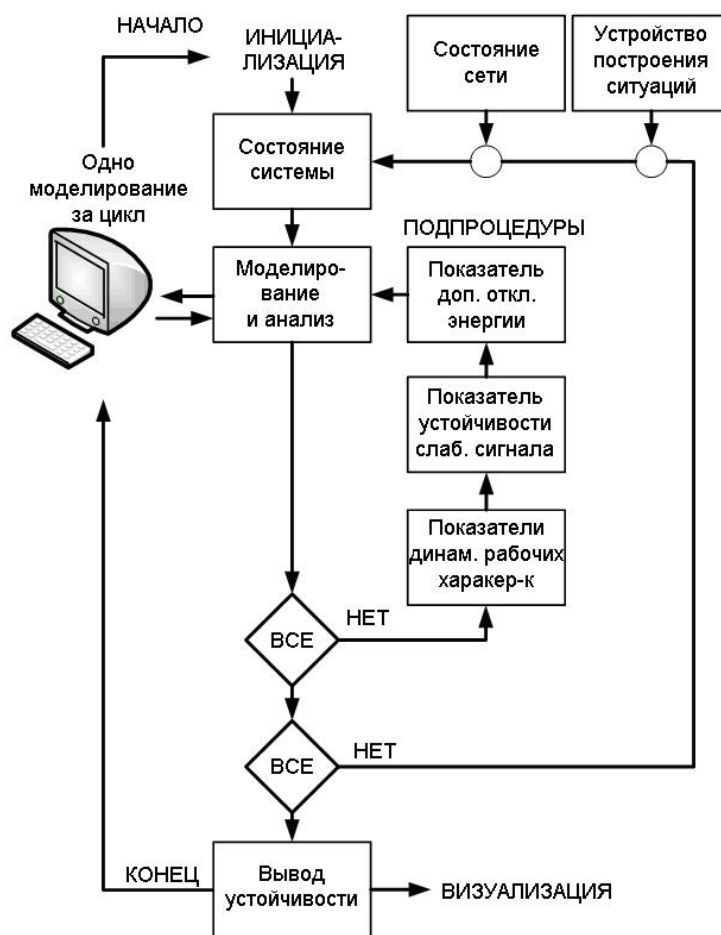


Рис. 3: Стратегия вычислений

3.1 Система расчета динамической устойчивости

Оценка различных аспектов устойчивости с помощью нескольких показателей работы приводит к необходимости обработки большого объема данных при расчете полного показателя. Есть много методов комбинирования показателей в один единственный, но ни один из этих методов не кажется более адекватным, чем основанный на нечеткой логике. При помощи перевода в нечеткую логику показателей, одинаково распределенных по интервалам от 0 до 1, многоступенчатая Система расчета на базе нечеткой логики (FIS) формирует полный динамический показатель работы. Пример алгоритма такого вывода хорошо описан в [8], а в нашей работе вместо трехуровневых функций принадлежности используются пятиуровневые функции принадлежности нечеткой логики (рис. 4). Структура трехступенчатой FIS показана на рисунке 5, на ее выходе формируется показатель динамической устойчивости на базе нечеткой логики (FDSI).

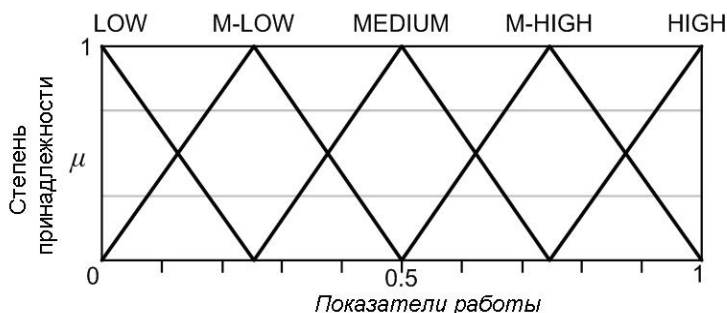


Рис. 4: Функция принадлежности для перевода показателей работы системы в нечеткую логику и обратно

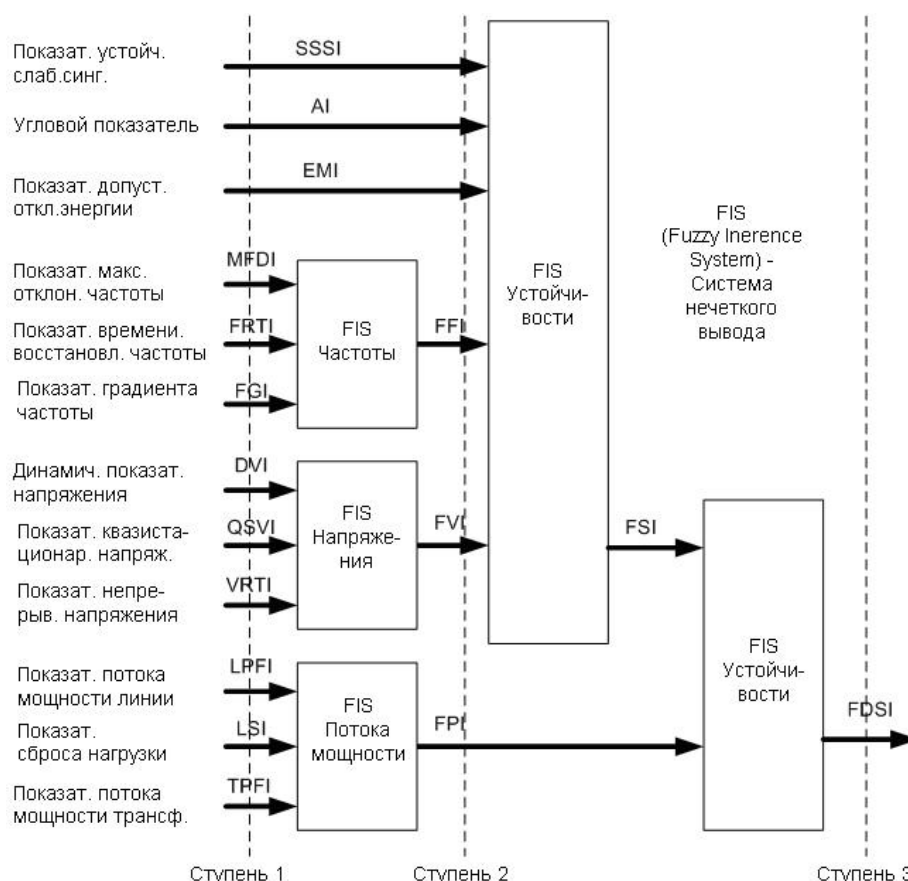


Рис. 5: Трехступенчатая системы вывода на базе нечеткой логики

3.2 Визуализация

Для того чтобы управлять возможностями построенного вычислительного алгоритма требуется графический интерфейс. Скриншоты концептуального решения приведены на рисунках 7 - 10. Основные возможности взаимодействия через окна интерфейса пользователя изображены на рис. 6. Отметим, что интерфейс находится в процессе разработки, поэтому некоторые процедуры здесь не оговорены. Главное окно (рис. 7) разделено на две части. В левой части расположены панели визуализации характеристик системы. Характеристики могут строиться в режиме реального времени или на базе протоколируемых данных. Идея состоит в том, чтобы выбрать точку на графике (с меткой времени) и соответственно настраивать модель системы до тех пор, пока не будет смоделировано выбранное состояние системы. Далее для определения того, сможет ли система в данном состоянии противостоять ряду нештатных ситуаций, используется моделирование во временной области.

Типовые и пользовательские нештатные ситуации легко можно смоделировать на базе функциональных возможностей модуля построения нештатных ситуаций (рис. 8). Модуль построения нештатных ситуаций автоматически считывает входные данные и составляет списки элементов сети (с сортировкой по имени и типу), которые могут быть затронуты при манипуляциях системы. Кроме того, чтобы облегчить данный процесс, визуализируется топология сети.

Выбор необходимых для расчета показателей осуществляется через окно выбора показателя. Показатель активизируется путем выставления флага (галочки) в соответствующей ячейке. Выбор показателя оказывает влияние непосредственно на стратегию вычислений: удаление показателей от списка ускоряет процесс вычисления, тогда как активирование их приводит к увеличению вычислительной нагрузки. Более того, каждый новый выбор подразумевает реорганизацию системы вывода на базе нечеткой логики. При этом правила нечеткой логики воссоздаются с учетом новых выбранных показателей, таким образом, обеспечивается точное вычисление полного показателя.

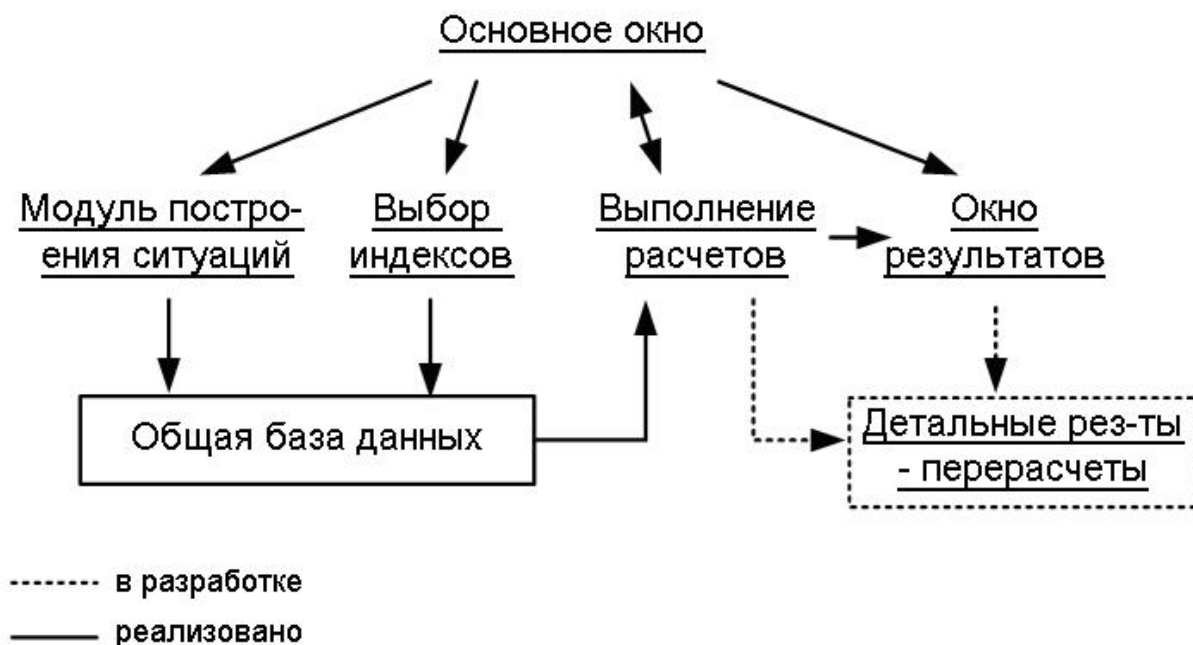


Рис. 6: Структура системы

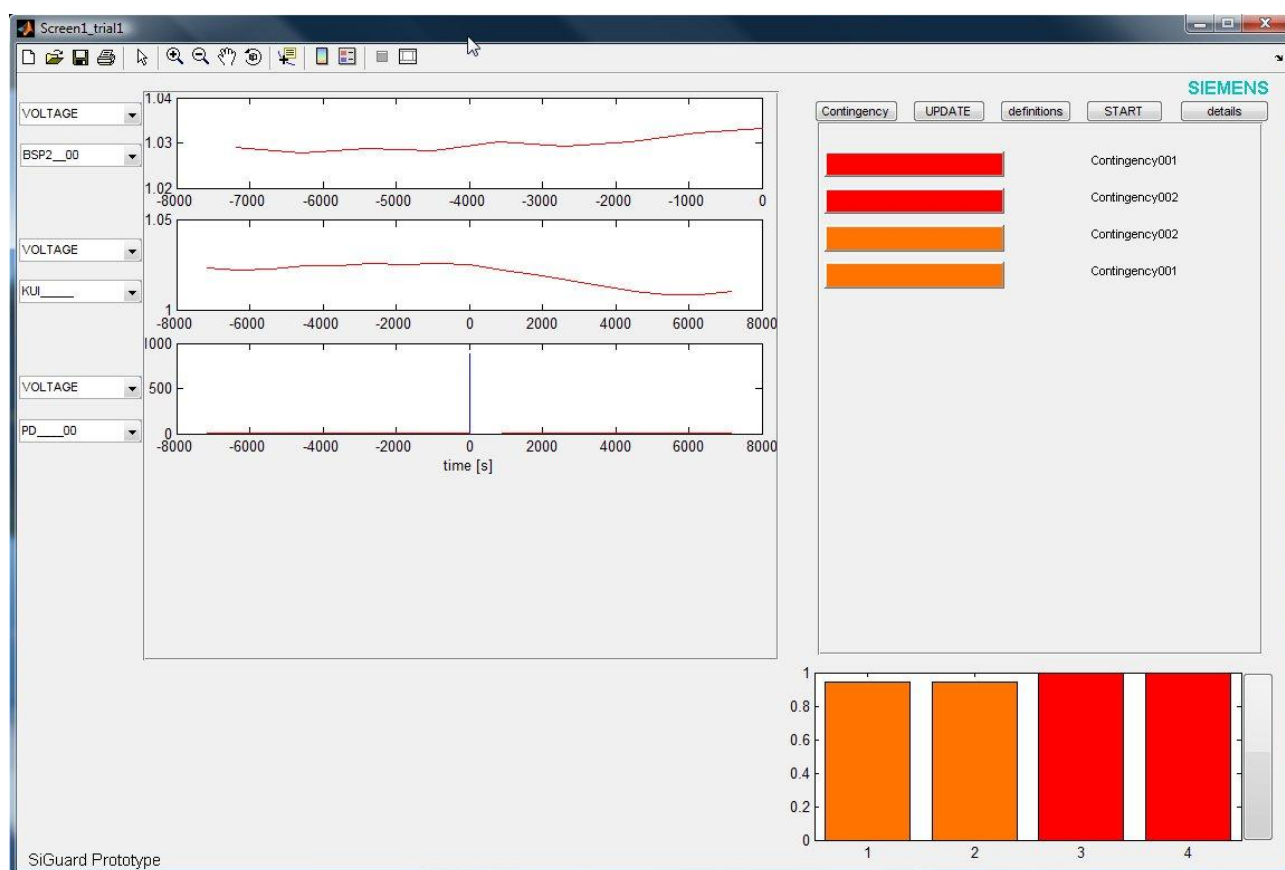


Рис. 7: Интерфейс пользователя – главное окно

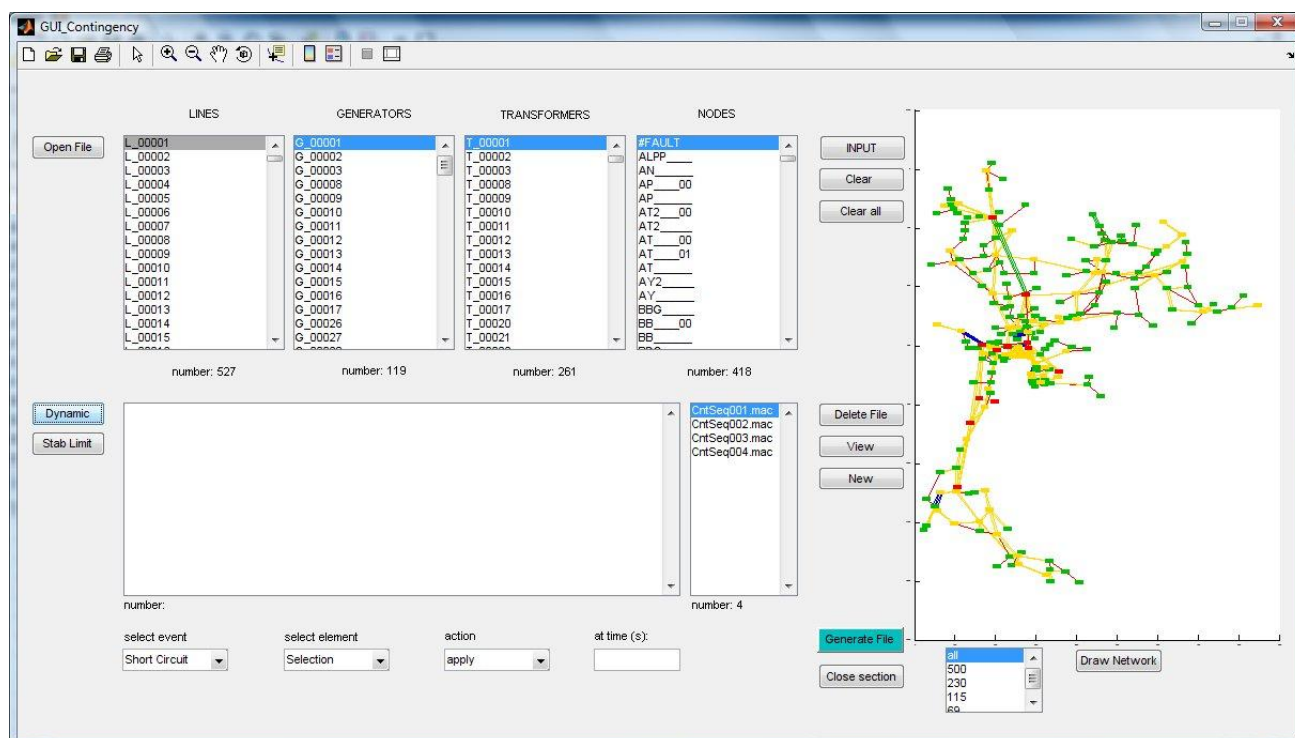


Рис. 8: Интерфейс пользователя – модуль построения нештатной ситуации

В правой части главного окна реализован дисплей уведомлений. Дисплей имеет матричный формат $n \times 1$, где n – число строк матрицы, соответствующее числу нештатных ситуаций; или, другими словами, каждая ячейка соответствует нештатной ситуации. Матрица служит для отображения полного показателя работы системы (FDSI) с помощью характерных цветов. Хотя здесь может подойти любой набор цветов, самое очевидное – использовать зеленый и красный для отображения абсолютно безопасного и опасного состояния системы, а смешение цветов служит для отображения промежуточного изменения устойчивости. Просто взглянув на дисплей, можно немедленно получить представление о работе системы при различных нештатных ситуациях. Случаи, нуждающиеся в более пристальном внимании, обозначены четко, они могут рассматриваться далее с более подробным изучением деталей.

Ситуацию можно изучить более внимательно через «окно результатов» (рис. 10). Аналогично главному окну, оно также условно разделено. В левой стороне расположены панели диаграмм, позволяющих визуализировать результаты моделирования, здесь можно выбирать графики различных величин сети, а на правой стороне, аналогично, расположена матрица визуализации, однако на этот раз она представляет собой структуру размера $n \times 6$. Отметьте, что обе матрицы визуализации, одна в главном окне и одна в окне результатов, связаны с третьей и второй ступенью FIS соответственно (см. рис. 5). Число строк n соответствует нештатным ситуациям, в то время как ячейки в строке соответствуют 6 аспектам устойчивости: стабильность слабых сигналов, стабильность при переходных процессах, динамика генератора, поведение частоты, отклонение напряжения и колебания мощности. Для оповещения о корректности работы системы снова используется система цветов. Аспекты устойчивости, выделенные красным, требуют более детального рассмотрения.

Более детальное рассмотрение возможно с помощью «окна детализированных результатов». Это окно связано со ступенью 1 FIS и представляет показатели работы в их оригинальном виде. Критические элементы сети обозначаются ясно и могут быть легко идентифицированы; например, если характеристики напряжения плохи, узлы с недостаточным напряжением будут выделены.

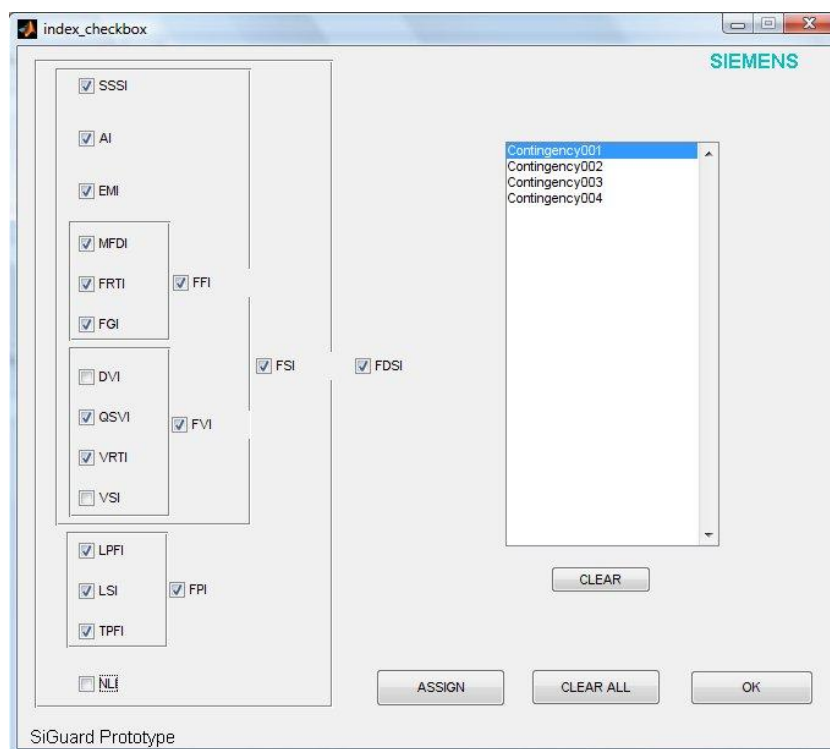


Рис. 9: Интерфейс пользователя – выбор показателей

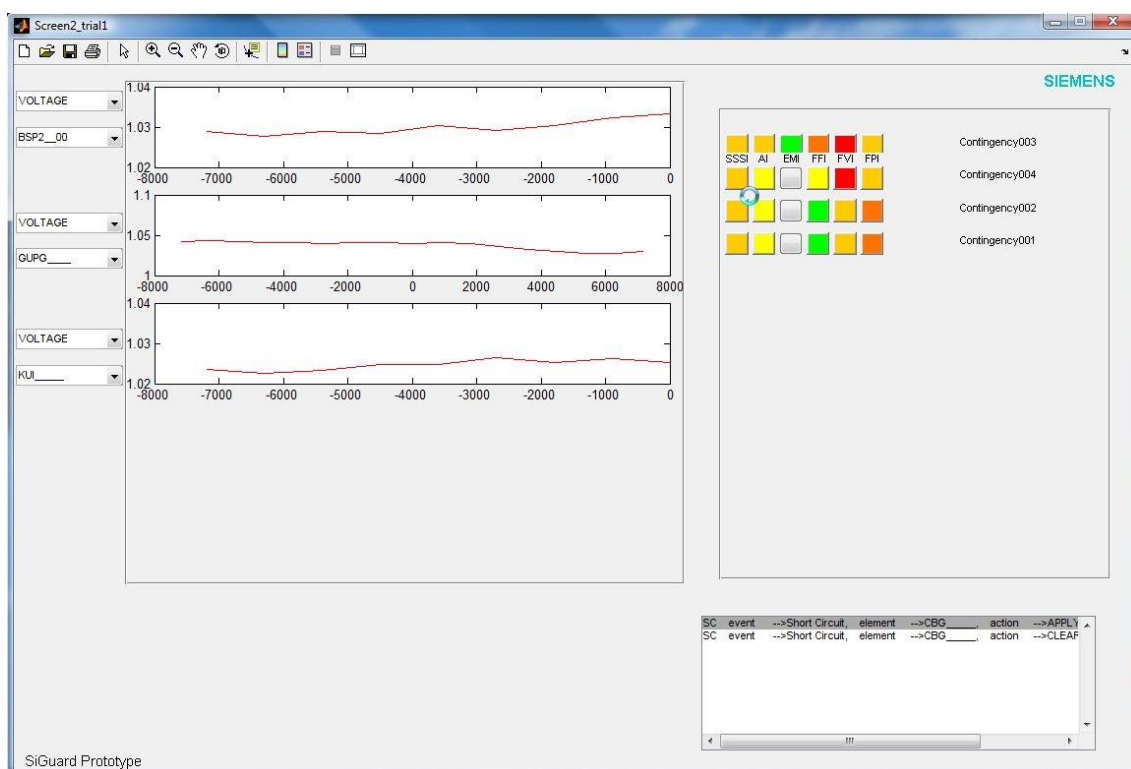


Рис. 10: Интерфейс пользователя – окно вывода результатов

4 АНАЛИЗ СИТУАЦИИ

Для проверки работы вычислительной стратегии используется модель большой энергосистемы. Основные характеристики модели таковы: 500-, 230-, 115 кВ и более низкие уровни напряжения, 259 трансформаторов, 119 генераторов и 515 передающих линий.

Основные сети 500- и 230 кВ изображены на рис. 11.

Производится моделирование 4 нештатных ситуаций: непосредственное отключение линии 500 кВ (А), непосредственное отключение генератора (В), самоустраняющееся 3-фазное повреждение (С) и 3-фазное повреждение, сопровождаемое отключением параллельных линий 500 кВ (D). Нештатные ситуации А, В и D оцениваются с точки зрения стабильности слабых сигналов и динамических характеристик работы, ситуация С - для всех аспектов устойчивости. Визуализация результатов через графический интерфейс приведена в разделе III (см. рис. 7 - 10). Ситуация А оценивается как условно безопасная (последняя позиция в матрице визуализации); тем не менее, она легко может развиться до опасной. Если после отключения электричества остающаяся линия останется отключенной, система будет разделена на две части и потеряет устойчивость. Данные условия изображены на рис. 12 и 13.

4.1 Производительность ЦП

Полное время выполнения расчетов состоит из двух фаз: время вычисления и время, требуемое для обработки данных после вычислений (чтение данных, выводы на базе нечеткой логики, запись файлов результатов и т.д.). Среднее время вычисления стабильности слабых сигналов составляет 6.69 секунд для каждой ситуации, вычисление стабильности при переходных режимах составляет 9.52 секунд для каждой ситуации, вычисление динамических характеристик работы системы занимает 13.52 секунд для каждой ситуации. Обработка данных после вычислений занимает приблизительно 5 - 6 секунд для каждой ситуации. В среднем, полное время выполнения вычисления всех аспектов устойчивости составляет 35 секунд для каждой ситуации. Понятно, что такие показатели скорости вычислений соответствует типовым требованиям, приведенным в общих чертах в разделе II, и, таким образом, считаются достаточными.

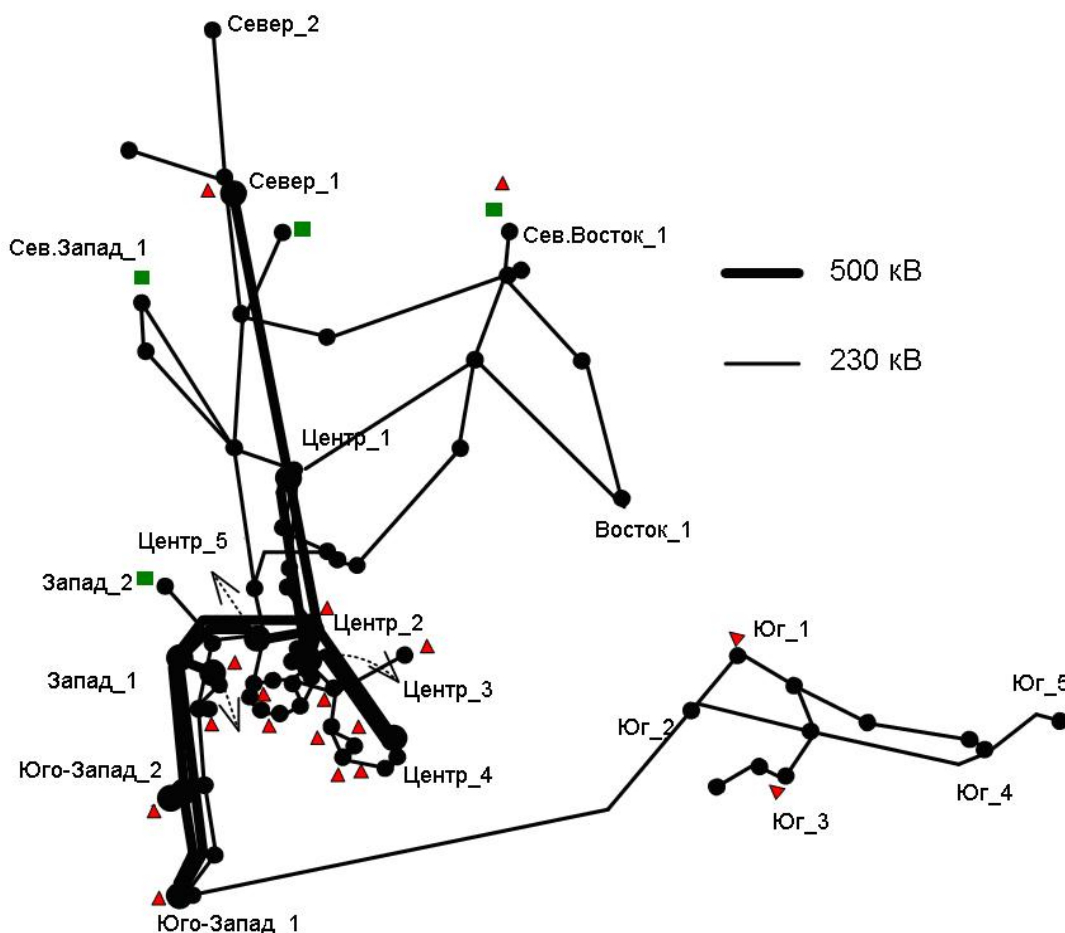


Рис. 11: Сети 500- и 230 кВ тестируемой системы

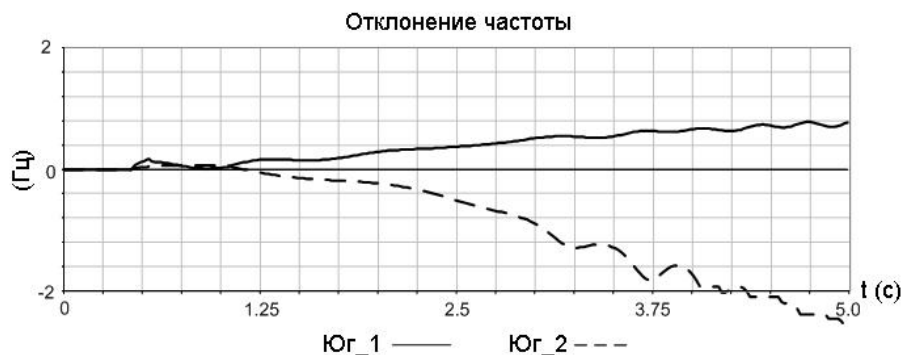


Рис. 12: Возникновение отклонения частоты в результате отключения коридора



Рис. 13: Возникновение отклонения напряжения в результате отключения коридора

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлено концептуальное решение, позволяющее быстро осуществлять вывод динамической устойчивости энергосистемы. Данное решение основано на применении показателей работы системы и смысловой визуализации. При помощи графического интерфейса пользователь может определить нештатные ситуации и сценарии, а также активизировать / дезактивировать вычислительные стратегии для оценки различных аспектов устойчивости. Как показал анализ ситуаций, результаты исследования выводятся в течение достаточного времени, таким образом, помимо офлайн-применений, имеется также потенциал для применения в режиме онлайн.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Ernst, L. Wehenkel, M. Pavella, "What is the likely future of real-time transient stability", in *Proce. of IEEE Power Systems Conference & Exposition*, 15-18 March, Seattle, 2009
- [2] K. Morison, L. Wang, P. Kundur, "Power System Security Assessment", *IEEE power & energy magazine*, September/ October 2004
- [3] S. Boroczky, E. Gentle, "Real-Time Transient Security Assessment in Australia at NEMMCO", in *Proce. of IEEE Power Systems Conference & Exposition*, 15-18 March, Seattle, 2009
- [4] L.E. Arnold, J. Hajagos, "LIPA Implementation of Real-Time Stability Monitoring in a CIM Compliant Environment", in *Proce. of Power Systems Conference & Exposition*, 15-18 March, Seattle, 2009
- [5] E. Lerch, O. Ruhle, D. Vickovic, "Real-Time Stability Assessment in the Control Centers of the ISO of Bosnia and Herzegovina and a National Dispatching System in North Africa", in *Proce of Power Systems Conference & Exposition*, 15-18 March, Seattle, 2009

- [6] C.K. Tang, C.E. Graham, M. El-Kady, R.T.H. Alden, "Transient Stability Index from Conventional Time domain Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994
- [7] U. Kerin, E. Lerch, G. Bizjak, "Small Signal Security Quantification of Highly Loaded Power Systems", in Proce. of IEEE Power Systems General meeting, 26 – 30 July, Calgary, 2009
- [8] J.M. Gimenez and P.E. Mercado, "A new approach for power system online DSA using distributed processing and fuzzy logic", Electric Power System Research 77 (2007), pp. 106 – 118
- [9] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets. Information and Control", 8:338–353, 1965