

Централизованная система демпфирования низкочастотных колебаний в энергосистемах на основе применения системы мониторинга переходных режимов

Д.В. СОРОКИН
ОАО «Северо-Западный Научно-Технический Центр»
Россия
dsorokin@nwec.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Технология синхронизированных векторных измерений, система мониторинга переходных режимов (СМПР), FACTS, гибкие системы передачи переменного тока, WACS/WAMPAC, демпфирование низкочастотных колебаний

1 ВВЕДЕНИЕ

В Единой энергетической системе России (ЕЭС России) существует ряд энергорайонов, в которых возможно возникновение технологических нарушений, обусловленных развитием незатухающих синхронных колебаний при каких-либо динамических возмущениях (коротких замыканиях, аварийном отключении синхронных генераторов и т.д.). К таким районам относится в первую очередь энергосистема Республики Коми, в которой подобные технологические нарушения фиксировались неоднократно. Кроме того, потенциально «опасными» с рассматриваемой точки зрения являются энергорайон Восточной части ОЭС Сибири, а также энергорайон транзита энергосистема Санкт-Петербурга и Ленинградской области – энергосистема Республики Карелия – энергосистема Мурманской области (далее – Кольско-Карельский транзит). Для указанных энергорайонов характерно возникновение плохо демпфируемых низкочастотных колебаний режимных параметров [1]. В случае прогнозируемого увеличения нагрузок потребителей возможно повышение загрузки системообразующей электрической сети этих энергорайонов и возникновение незатухающих синхронных колебаний. В работе [2] представлены результаты анализа возможности возникновения плохо демпфируемых («опасных») частот в существующей и перспективных схемах ОЭС Северо-Запада в течение 2011-2018гг. (с учетом планируемых вводов и демонтажей электросетевого и генераторного оборудования). В этой публикации показано, что планируемое в период до 2018 года развитие электросетевой инфраструктуры и генерирующих мощностей в ОЭС Северо-Запада не обеспечивает сколь-либо значимого повышения качества демпфирования колебаний режимных параметров в рассматриваемом энергообъединении. Величины частот плохо демпфируемых колебаний, характерные для энергосистемы Республики Коми, Кольско-Карельского транзита и Восточной части ОЭС Сибири представлены в табл. 1.

№	Район	«Опасная» частота колебаний
1	Энергосистема Республики Коми	$0,5 \div 0,6$ Гц
2	Кольско-Карельский транзит	$0,3 \div 0,4$ Гц
3	Восточная часть ОЭС Сибири	$0,6 \div 0,7$ Гц

Табл. 1: Основные плохо демпфируемые («опасные») частоты колебаний для ряда энергорайонов ЕЭС России

2 МЕРОПРИЯТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

Основным и наиболее экономически целесообразным мероприятием для повышения качества демпфирования колебаний в ЕЭС России является перенастройка существующих автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов, либо выполнение модернизации систем возбуждения синхронных генераторов (с заменой систем возбуждения на быстродействующие системы и применением микропроцессорных АРВ сильного действия).

В большинстве случаев, возникновение низкочастотных колебаний в энергосистемах обусловлено движением роторов одной группы синхронных генераторов относительно роторов другой группы (или групп) генераторов. Это приводит к тому, что ликвидировать¹ низкочастотные колебания на основе перенастройки АРВ (модернизации системы возбуждения) какого-то одного синхронного генератора невозможно. Для обеспечения эффективного демпфирования низкочастотных колебаний требуется перенастройка АРВ (модернизация систем возбуждения) ряда синхронных генераторов. При этом отдельной задачей является выявление генераторов, в наибольшей степени ответственных за возникновение «опасных» частот в энергосистемах.

На демпфирование низкочастотных колебаний в ЕЭС России может оказать значительное влияние происходящее в настоящее время внедрение нового электротехнического оборудования – устройств FACTS (гибких систем передач переменного тока). К устройствам FACTS относятся статический тиристорный компенсатор (СТК), управляемое устройство продольной компенсации (УУПК), СТАТКОМ, асинхронизированные компенсаторы реактивной мощности (АСК), управляемые шунтирующие реакторы (УШР) и др. Примерами ввода в эксплуатацию в ЕЭС России устройств FACTS являются установка СТК номинальной мощностью 100 Мвар на ПС 500 кВ Ново-Анжерская, установка СТК номинальной мощностью 150 Мвар на ПС 500 кВ Заря; установка двух АСК номинальной мощностью по 100 Мвар каждый на ПС 500 кВ Бескудниково (Московская область); ввод в эксплуатацию СТАТКОМ на ПС 400 кВ Выборгская и т.д. Кроме того, существуют проекты по оснащению Кольско-Карельского транзита, а также транзита энергосистема Архангельской области – энергосистема Республики Коми устройствами FACTS (рассматривается возможность и целесообразность применения различных устройств, в первую очередь – СТК, СТАТКОМ и УУПК). Эти проекты рассматриваются как реализация планов ОАО «ФСК ЕЭС» по внедрению элементов интеллектуальной энергосистемы с элементами активно-адаптивной сети в ЕЭС России. Решается вопрос о включении УУПК в схему выдачи мощности Саяно-Шушенской ГЭС.

В большинстве случаев, устройства FACTS оснащаются системами автоматического регулирования (САР), значения настроечных параметров которых непосредственно влияют на динамические (колебательные) свойства энергосистем. Некорректная (неправильная) настройка этих систем может привести к развитию незатухающих синхронных колебаний в энергосистеме. С другой стороны, выбор и оптимизация значений настроечных параметров САР может служить эффективным мероприятием для повышения качества демпфирования колебаний, в том числе низкочастотных.

Перспективным направлением является обеспечение требуемого качества демпфирования колебаний в энергосистемах на основе применения в АРВ синхронных генераторов и в системах автоматического регулирования устройств FACTS дополнительных каналов с входными сигналами от системы мониторинга переходных режимов (СМПР). В работе [3] показано, что ввод в АРВ синхронного генератора такого канала позволяет значительно повысить качество демпфирования колебаний. В настоящей работе рассматривается концепция создания централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний в ЕЭС России. Эта концепция основана на применении сигналов от СМПР в системах автоматического регулирования различного силового оборудования (устройствах FACTS и синхронных генераторов). Следует подчеркнуть, что эта работа посвящена, в первую очередь, оценке возможностей применения технологии векторных измерений с целью повышения качества демпфирования колебаний в энергосистемах.

¹ Обеспечить повышение качества демпфирования колебаний до требуемого уровня.

3 ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕСТОВОЙ СХЕМЫ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Тестовая схема энергосистемы представлена на рис. 1. В состав энергосистемы входят пять электростанций (ЭС-1, ЭС-2, ЭС-3, ЭС-4 и ЭС-5), объединенные на параллельную работу через электрическую сеть 330 кВ. Указанные электростанции обеспечивают возможность покрытия дефицита мощности в энергосистеме. На ПС №1 установлен СТК номинальной мощностью 60 Мвар, в расщелку ВЛ 330 кВ ПС №2 – ПС №3 включено УУПК номинальной мощностью 142 Мвар (вблизи шин ПС №3). Особенностью рассматриваемой энергосистемы является наличие плохо демпфируемой составляющей движения, соответствующей частоте колебаний порядка 0,3 Гц. Наличие такой составляющей движения свидетельствует о том, что динамические возмущения в энергосистеме приводят к возникновению низкочастотных колебаний режимных параметров электрической сети. Модель энергосистемы разработана в программно-вычислительном комплексе (ПВК) EUROSTAG [4]. При разработке модели энергосистемы использованы модели элементов из стандартных библиотек указанного программного комплекса. Синхронные генераторы смоделированы на основе уравнений Парка-Горева. Все синхронные генераторы в энергосистеме оснащены автоматическими регуляторами возбуждения сильного действия. Турбина представлена упрощенной моделью.

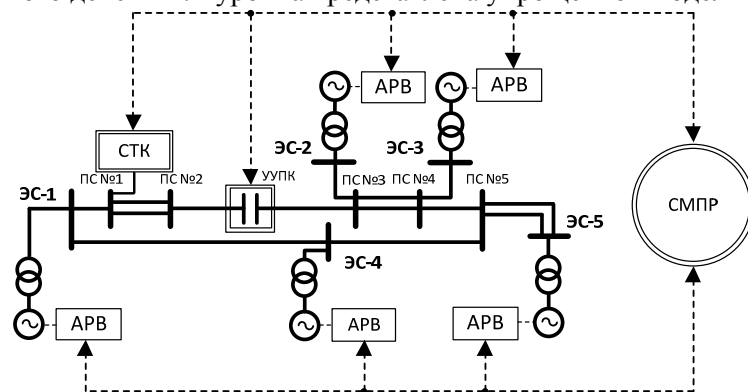


Рис. 1: Тестовая схема энергосистемы

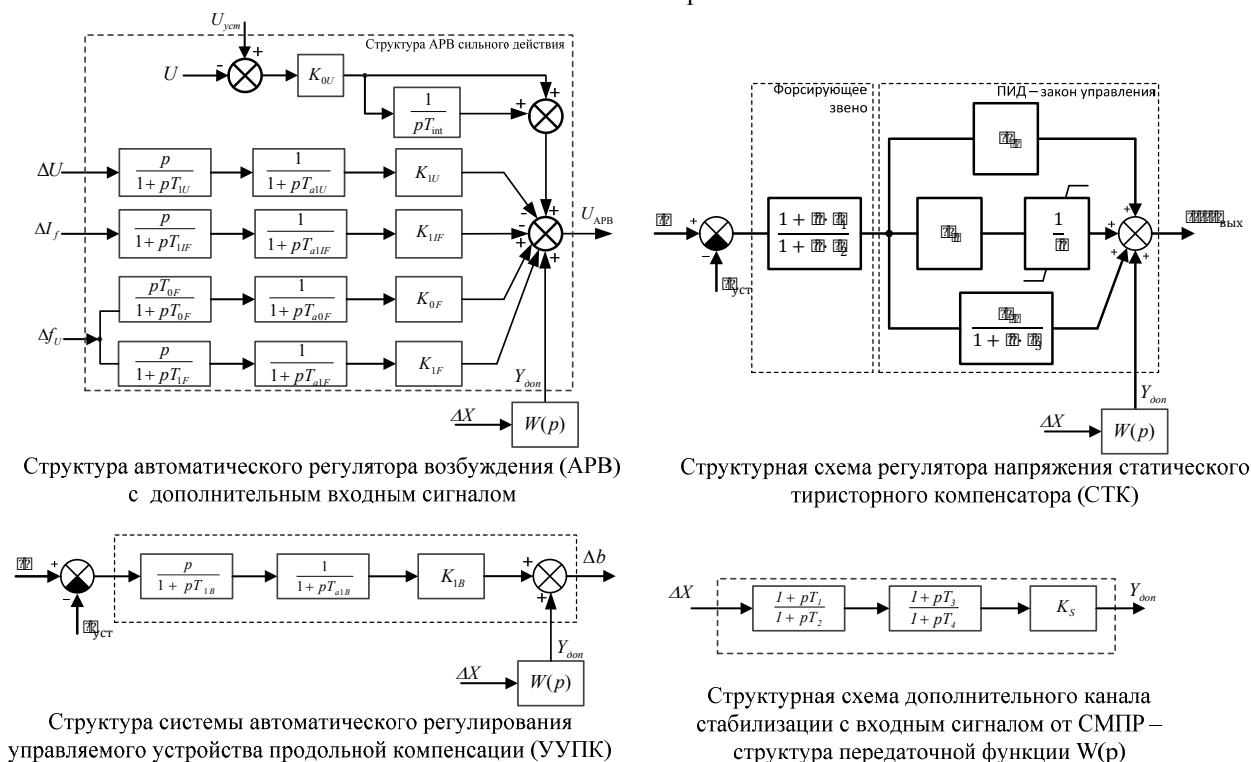


Рис. 2: Структурные схемы систем автоматического регулирования различного электротехнического оборудования

Структурные схемы использованных в настоящей работе моделей систем автоматического регулирования СТК, УУПК, а также автоматического регулятора возбуждения представлены соответственно на рис. 2. Эти модели оснащены дополнительным каналом стабилизации с входным сигналом от СМПР. Структурная схема закона регулирования, реализуемого в указанном канале стабилизации, также представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, дополнительный канал представляет собой два последовательно соединенных форсирующих звена с коэффициентом усиления. В качестве входных сигналов для дополнительного канала могут использоваться различные режимные параметры, регистрируемые СМПР (углы векторов напряжений в энергоузлах, перетоки активной мощности по линиям электропередачи и т.д.). В настоящей работе в качестве входных сигналов приняты отклонения частот вращения роторов синхронных генераторов. Следует отметить, что в настоящее время не существует какой-либо общепринятой структуры для систем автоматического регулирования СТК и УУПК. Синтез оптимальных законов управления для этих систем является актуальной и перспективной задачей.

4 ВЫБОР ВХОДНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КАНАЛА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Эффективной методикой для выбора входных сигналов (входными сигналами, например, могут быть отклонение напряжений или изменение частоты вращения ротора генератора) для дополнительных каналов систем регулирования электроэнергетического оборудования является применение методов модального анализа [1, 5]. При выполнении модального анализа рассматривается линеаризованная система энергосистемы, для которой вычисляются различные модальные характеристики (резонансные частоты в энергосистеме, коэффициенты синфазности, декременты затухания компонент движения в энергосистеме, коэффициенты участия и т.д.). Модальные характеристики позволяют получить информацию о динамических и колебательных свойствах энергосистемы.

Вычисление собственных чисел системы позволяет выявить плохо демпфируемые составляющие движения в энергосистемах, а также резонансные («опасные») частоты колебаний, т.е. частоты, на которых возможно развитие незатухающих синхронных колебаний. Вычисление значений элементов правого собственного вектора системы (коэффициентов синфазности) позволяет определить тип синхронных колебаний в энергосистемах (межсистемные, внутригрупповые или локальные колебания). Вычисление значений коэффициентов участия, определяемых как произведение левого и правого собственных векторов, позволяет выявить генераторы в энергосистемах, в наибольшей степени влияющие на качество демпфирования колебаний на рассматриваемой частоте. Коэффициент участия является удобным количественным критерием при определении генераторов-претендентов для установки автоматических регуляторов сильного действия (системных стабилизаторов).

На основе применения методов модального анализа автором статьи разработана методика определения мест установки АРВ сильного действия в энергосистемах при минимизации количества применяемых регуляторов возбуждения и обеспечении требуемого качества демпфирования [6]. Кроме того, применение методов модального анализа позволяет определить генераторы в энергосистеме, автоматические регуляторы возбуждения которых настроены некорректно и возможно улучшение качества демпфирования колебаний за счет перенастройки указанных АРВ; определить генераторы, системы возбуждения которых необходимо модернизировать в первую очередь с целью повышения запасов устойчивости в энергосистеме; разработать поэтапную программу модернизации систем возбуждения генераторов, позволяющую обеспечить наилучшее качество демпфирования синхронных колебаний на каждом этапе указанной программы; выполнить верификацию динамических моделей по данным регистраторов СМПР (путем сравнения резонансных частот, выявленных при анализе осциллограмм СМПР, и резонансных частот цифровой динамической модели энергосистемы); выполнить анализ причин технологических нарушений, связанных с возникновением синхронных колебаний в энергосистемах.

В табл. 2 представлены результаты расчета собственных чисел в тестовой схеме энергосистемы (до оптимизации настроек систем автоматического регулирования). В таблице

представлен только ряд собственных чисел, соответствующий минимальным значениям показателя демпфирования. Показатель демпфирования является количественным критерием качества демпфирования рассматриваемой составляющей движения и определяется следующим образом:

$$\zeta_i = -\frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}}, \quad (1)$$

где $\alpha_i + j \cdot \beta_i$ – i -ое собственное число системы.

Из табл. 2 видно, что в энергосистеме присутствуют несколько плохо демпфируемых составляющих движения. Минимальный показатель демпфирования соответствует составляющей движения с частотой колебаний порядка 0,3 Гц. Кроме того, в энергосистеме присутствуют плохо демпфируемые составляющие движения с частотами в диапазоне от 0,14 Гц до 0,16 Гц. **На всех указанных частотах возможно развитие незатухающих синхронных колебаний в энергосистеме.**

№	Собственное число	Частота, Гц	Показатель демпфирования ζ , %
1	-0,22+j2,12	0,34	10
2	-0,13+j0,95	0,15	14
3	-0,14+j0,90	0,14	15
4	-0,17+j1,00	0,16	17
5	-1,10+j6,05	0,96	18

Табл. 2: Собственные числа энергосистемы, соответствующие наиболее плохо демпфируемым составляющим движения

№	Электростанция	Коэффициент синфазности, о.е.	Коэффициент участия, о.е.
1	ЭС-1	<u>$1,0 \cdot e^{j(-127^\circ)}$</u>	<u>0,80</u>
2	ЭС-2	$0,6 \cdot e^{j52^\circ}$	0,15
3	ЭС-3	$0,7 \cdot e^{j51^\circ}$	0,19
4	ЭС-4	$0,2 \cdot e^{j69^\circ}$	0,08
5	ЭС-5	$0,9 \cdot e^{j61^\circ}$	<u>1,00</u>

Табл. 3: Модальные характеристики тестовой схемы энергосистемы

В табл. 3 представлены результаты расчета коэффициентов синфазности и коэффициентов участия для частоты колебаний 0,3 Гц. Из таблицы видно, что возникновение резонансной частоты порядка 0,3 Гц обусловлено движением роторов синхронных генераторов электростанций ЭС-2, ЭС-3, ЭС-4 и ЭС-5 относительно роторов генераторов электростанции ЭС-1. Это свидетельствует о том, что частота 0,3 Гц является межсистемной. Кроме того, из таблицы видно, что наибольшие значения коэффициентов участия генераторов в движении на резонансной частоте 0,3 Гц соответствуют генераторам электростанций ЭС-1 и ЭС-5. Таким образом, в АРВ синхронных генераторов ЭС-1 и ЭС-5 целесообразно ввести дополнительный канал с входным сигналом от СМПР, равный разности частот вращения (ω) роторов этих генераторов. Аналогичным образом можно определить, что для повышения качества демпфирования колебаний на частотах в диапазоне от 0,14 Гц до 0,16 Гц в АРВ генераторов ЭС-2, ЭС-3 и ЭС-4 необходимо ввести сигнал, равный $\Delta\omega = \omega_{ЭС-2} - \omega_{ЭС-4}$. Результаты модального анализа энергосистемы свидетельствуют также о том, что этот же сигнал ($\Delta\omega = \omega_{ЭС-2} - \omega_{ЭС-4}$) целесообразно ввести в системы автоматического регулирования СТК и УУПК.

Следует отметить, что применяемые в настоящее время на объектах электроэнергетики России регистраторы СМПР не обеспечивают возможности получения измерений частоты вращения и углов роторов генераторов. Однако анализ возможностей регистраторов СМПР зарубежного производства свидетельствует о том, что получение векторных измерений такого типа возможно [8].

5 ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Качество демпфирования колебаний режимных параметров в энергосистеме в случае ввода в системы автоматического регулирования электротехнического оборудования дополнительных каналов с входным сигналом от СМПП непосредственным образом зависит от выбранных значений настроечных параметров этих каналов (в данном случае, от значений параметров T_1, T_2, T_3, T_4 и K_S). Эффективной методикой для выбора и оптимизации значений настроечных параметров каналов регуляторов является применение одного из методов многопараметрической оптимизации – генетического алгоритма [7, 10, 11]. Генетический алгоритм является разновидностью эволюционных алгоритмов. Особенностью генетического алгоритма является то, что принципы, по которым происходит отбор претендентов на оптимальное решение при выполнении этого алгоритма, основаны на законах генетики (как науки о закономерностях наследственности и изменчивости) и принципах естественного отбора в живой природе. В связи с этим, для описания генетических алгоритмов традиционно применяется терминология, заимствованная из генетики. Основными преимуществами применения генетического алгоритма по сравнению с применением традиционных методов оптимизации (например, градиентного метода) являются отсутствие необходимости вычисления производных целевой функции, а также стойкость к попаданию в локальные экстремумы. Опыт практического применения генетического алгоритма (в частности, для настройки автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов) свидетельствует об эффективности и целесообразности используемого подхода [6, 10, 11].

Оптимизация настроечных параметров дополнительных каналов электроэнергетического оборудования в тестовой схеме энергосистемы выполнена на основе применения комплексного критерия качества переходного процесса (с учетом ограничений $X \in [X_{\min}; X_{\max}]$):

$$F(X, \Delta T) = \sum_i \alpha_i \int_0^{\Delta T} [Y_i(X, t) - Y_i(0)]^2 dt + \alpha_0 \sum_j |\lambda_j - \lambda_0|, \quad (2)$$

где $Y_i(X, t)$ – значение оптимизируемого режимного параметра; $Y_i(0)$ – установившееся значение оптимизируемого параметра; ΔT – длительность расчета целевой функции, с; X – вектор-столбец значений оптимизируемых параметров; α_i – весовые коэффициенты; λ_j – собственные числа системы; $X_{\min}$ – вектор-столбец минимальных значений оптимизируемых параметров; $X_{\max}$ – вектор-столбец максимальных значений оптимизируемых параметров.

Результаты оптимизации значений настроечных параметров дополнительных каналов АРВ синхронных генераторов и систем автоматического регулирования СТК и УУПК представлены в табл. 4. Оптимизация выполнена на основе применения генетического алгоритма. Начальное приближение значений всех оптимизируемых параметров принято нулевым.

№	Параметр	Ед. изм.	АРВ ЭС-1	АРВ ЭС-2	АРВ ЭС-3	АРВ ЭС-4	АРВ ЭС-5	АРВ ЭС-6	САР СТК	САР УУПК
1	T1	с	0,03	0,02	0,03	0,22	0,25	0,02	0,18	0,59
2	T2	с	0,01	0,01	0,02	0,14	0,10	0,01	0,11	0,30
3	T3	с	0,32	0,20	0,25	0,21	0,20	0,27	0,20	0,03
4	T4	с	0,19	0,09	0,03	0,05	0,09	0,46	0,15	0,01
5	KS	о.е.	95	60	55	70	80	90	25	10

Табл. 4: Значения настроечных коэффициентов дополнительного канала в системах автоматического регулирования электроэнергетического оборудования

6 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ

На рис. 3а представлены осциллограммы изменение величины активной мощности генератора электростанции ЭС-5 при тестовом возмущении в случае применения в тестовой схеме энергосистемы централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний (системы WACS), а также изменение величины активной мощности этого генератора без применения указанной системы. На рис. 3б представлены аналогичные осциллограммы, иллюстрирующие изменение величины напряжения на шинах генератора электростанции ЭС-5. Тестовое возмущение представляет собой подачу тестового импульса на выходной сумматор автоматического регулятора возбуждения. Из представленных рисунков видно, что ввод в системы автоматического регулирования силового оборудования дополнительного канала с входным сигналом от СМРР (в случае корректного выбора и оптимизации настроек этого канала) позволяет **значительно повысить качество демпфирования низкочастотных колебаний режимных параметров в энергосистеме.**

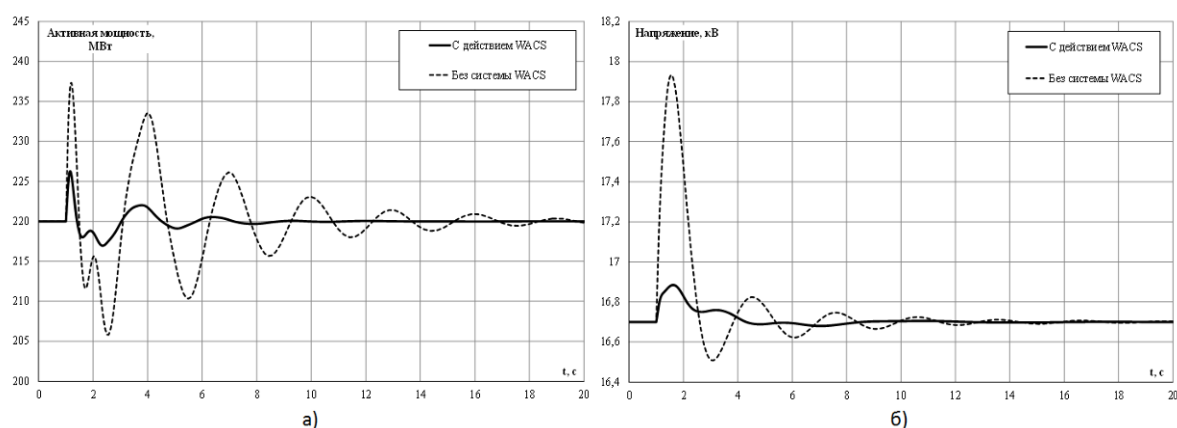


Рис. 3: Оценка эффективности применения централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний (системы WACS)

Следует отметить, что под централизованной системой демпфирования низкочастотных колебаний в ЕЭС России целесообразно понимать не только промышленно-технический комплекс, реализующий функции автоматического управления электрическими режимами в энергосистемах, но также и проработку вопросов анализа динамических (колебательных) свойств энергосистем на этапе проектирования энергосистем. Результатом такой проработки может являться разработка рекомендаций по ликвидации низкочастотных колебаний в перспективных схемах энергосистем. Этот вопрос подробно рассмотрен в публикации [2]. Элементы централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний в энергосистемах представлены на рис. 4.

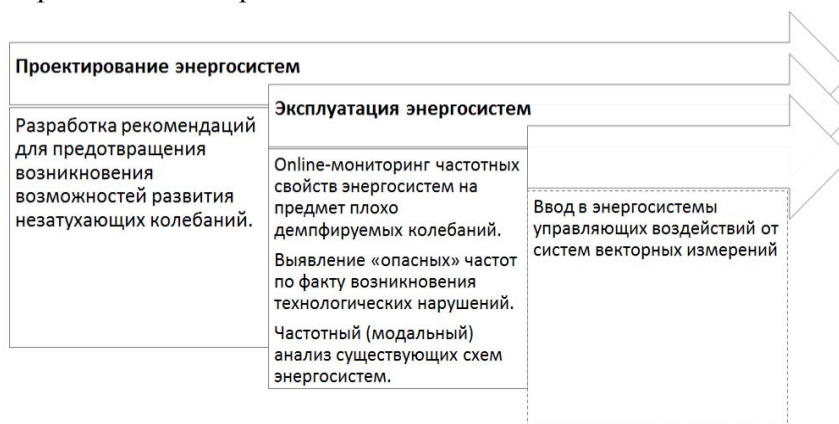


Рис. 4: Элементы централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний

7 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ЕЭС России существует ряд энергорайонов, в которых возможно возникновение технологических нарушений, обусловленных развитием незатухающих синхронных колебаний. Обеспечить возможность предотвращения таких технологических нарушений возможно на основе применения внедряемых в настоящее время в электроэнергетику новых технологий (технологий векторных измерений) и новых типов силового оборудования (устройств FACTS).
2. Ввод в системы автоматического регулирования различного электроэнергетического оборудования (автоматических регуляторов возбуждения синхронных генераторов и автоматических систем регулирования устройств FACTS) позволяет обеспечить повышение качества демпфирования низкочастотных колебаний режимных параметров в энергосистемах.
3. На основе представленной в настоящей статье концепции возможно построение и внедрение в ЕЭС России централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний режимных параметров (будущей системы WACS – Wide-area control system). Применение такой системы обеспечит возможность повышения надежности функционирования ЕЭС России.

Создание централизованной системы демпфирования низкочастотных колебаний возможно на базе ОАО «Северо-Западный Научно-Технический Центр», имеющего все необходимые компетенции и средства для построения такой системы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сорокин Д.В. Выбор мест установки автоматических регуляторов возбуждения сильного действия в ОЭС Сибири на основе применения модального анализа // Сборник докладов международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». – 2011. – Том №1. – С. 197-203.
- [2] Сорокин Д.В. Оценка влияния планируемых вводов генераторного и электросетевого оборудования на качество демпфирования колебаний в перспективных схемах энергосистем на примере ОЭС Северо-Запада // Известия НТЦ ЕЭС, №66. – 2012.
- [3] Сорокин Д.В. Возможности применения системных стабилизаторов синхронных генераторов с входными сигналами от регистраторов системы мониторинга переходных режимов (СМПР) // Сборник статей Международной конференции Релейная защита и автоматика. – г. Москва. – 2012.
- [4] ПБК EUROSTAG, www.eurostag.be
- [5] Сорокин Д.В. Применение модального анализа для определения причин возникновения низкочастотных колебаний в энергосистемах. // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды всероссийской научно-технической конференции: сборник статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ, 2010. Т.1 – С. 264-268.
- [6] Сорокин Д.В. Координация настроек автоматических регуляторов возбуждения генераторов на основе применения генетического алгоритма // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – №1. – С. 18-25.
- [7] Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. Горячая Линия – Телеком. – 2007.
- [8] Сорокин Д.В. Повышение эффективности применения статических тиристорных компенсаторов в энергосистемах на основе оптимизации настроек их систем регулирования // Известия НТЦ ЕЭС, №66. – 2012.
- [9] Qixun Yang, Beijing Sifang, Bi Tianshu. WAMS Implementation in China and the Challenges for Bulk Power System Protection. Power Engineering Society General Meeting. – 2007.
- [10] Abdel-Magid, Y.L.; Abido, M.A. Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms. Power Systems, IEEE Transactions on. Volume: 18, Issue: 3. – 2003.
Abdel-Magid, Y.L.; Abido, M.A.; Al-Baiyat, S.; Mantawy, A.H. Simultaneous stabilization of multimachine power systems via genetic algorithms. Power Systems, IEEE Transactions on. Volume: 14, Issue: 4. – 1999.