

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ ТУРБИН

Ю.С. Боровиков, А.О. Сулайманов, Р.А. Уфа (Томский политехнический университет)

Рассмотрено моделирование противоаварийной автоматики регулирования частоты и мощности турбин, реализованное в среде всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем. Представлены результаты экспериментальных исследований моделирования противоаварийного управления мощностью турбины для обеспечения динамической и статической устойчивости в энергосистеме¹.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, моделирование, реальное время, достоверность, автоматика регулирования частоты и мощности турбины, управляющее воздействие, разгрузка турбины.

Введение

Разработка методов и средств эффективного регулирования частоты и мощности турбин, особенно в аварийных режимах, является важной задачей обеспечения надежного и энергоэффективного функционирования основного оборудования и электроэнергетических систем (ЭЭС) в целом. В частности, одной из востребованных задач является определение оптимальных настроек противоаварийной автоматики регулирования частоты и мощности турбин ЭЭС.

Актуальность данной задачи подтверждается результатами ряда работ и исследований, выполненных проектными, научно-исследовательскими институтами и наладочными организациями (ОАО «ВТИ», ОАО «Фирма ОРГРЭС», ЗАО «Интеравтоматика» и др.), а также директивными документами: Стандарт ОАО «СО ЕЭС» и др. [1, 2].

В рамках решения обозначенной задачи необходимым является получение полной и достоверной информации об условиях работы ЭЭС во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах, в том числе автоматики регулирования частоты и мощности (АРЧМ) энергоблоков, особенно противоаварийного управления мощностью турбин. Эффективное решение поставленной задачи требует проведения значительного числа натурных экспериментов, что является трудно реализуемым ввиду известной специфики функционирования ЭЭС. В связи с этим единственно эффективным подходом является применение математического моделирования [3].

В настоящее время для анализа работы ЭЭС применяют в основном цифровые моделирующие комплексы, предельные возможности которых известны и определяются применяемыми численными методами решения. Поэтому при разработке моделей энергетического оборудования исходят из необходимого объема упрощений и допущений, связанных с необходимостью декомпозиции непрерывного единого спектра квазиустановившихся и переходных процессов [4].

Между тем эффективной альтернативой сугубо цифровому мо-

делированию может служить гибридное моделирование, основанное на синтезе различных подходов, максимально удовлетворяющих требованиям исследовательских и эксплуатационных задач, для решения которых они разрабатываются. Примером моделирующего комплекса, разработанного по данному принципу, является созданный в Энергетическом институте Томского политехнического университета всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [5, 6]. Представленные в [7, 8, 9] возможности и свойства ВМК РВ ЭЭС позволяют эффективно решать обозначенные задачи, в том числе настройку и тестирование АРЧМ во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ЭЭС.

Рассмотрим возможности моделирования АРЧМ и противоаварийного управления мощностью турбины генератора на ВМК РВ ЭЭС для решения задач по разработке методик оптимальной настройки АРЧМ.

Математическая модель автоматических систем регулирования частоты и мощности турбин в среде ВМК РВ ЭЭС

На основе анализа известных и проверенных практикой физико-математических описаний звеньев и структур эксплуатируемых в настоящее время в российских энергосистемах различных гидромеханических, в том числе с электрогидравлическими приставками, и электрогидравлических АРЧМ была составлена математическая модель противоаварийной автоматики [10]. На рис. 1 приведена упрощенная структурная схема модели агрегата турбина-генератор.

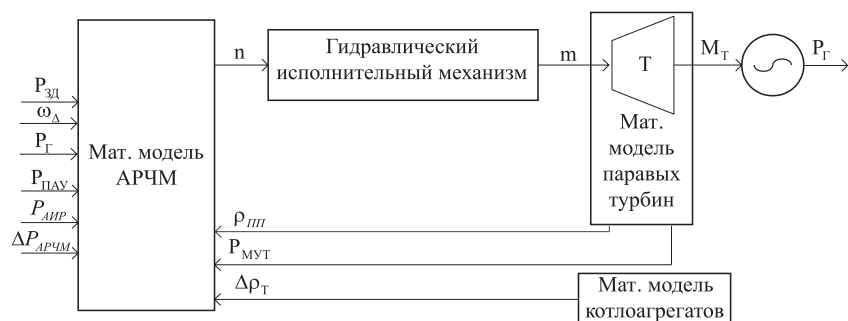


Рис. 1. Структурная схема модели агрегата турбина-генератор

¹ Работа выполнена при поддержке мегагранта ТПУ № ВИУ_ЭНИН_138_2014 – «Гибридное моделирование и управление в интеллектуальных энергосистемах».

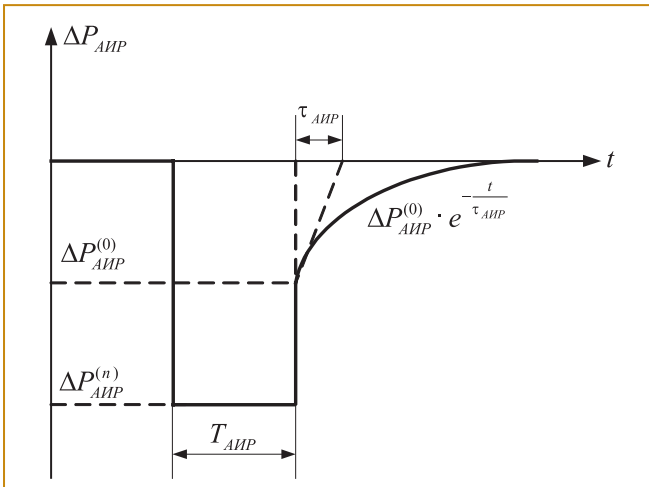


Рис. 2. Управляющее воздействие импульсной противоаварийной разгрузки, где $\Delta P_{AИР} = var$ – глубина АИР, $n = var$ – индекс глубины разгрузки; $T_{AИР} = var$ – длительность АИР; $\Delta P_{AИР}^{(0)}$ – часть $\Delta P_{AИР}$, снимаемая по экспоненциальному закону $\Delta P_{AИР}^{(0)} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{AИР}}}$, $\tau_{AИР} = var$.

Входными параметрами математической модели АРЧМ являются:

- $P_{зд}$ – задаваемая в регуляторе мощности мощность нагрузки энергоблока;
- ω – управляющее воздействие, формируемое измерителем скорости вращения турбины;
- $P_{г}$ – текущее значение мощности генератора;
- $P_{ПАУ}$ – задаваемое значение послеаварийной разгрузки (догрузки) энергоблока;
- $P_{AИР}$ – величина противоаварийной автоматической импульсной разгрузки (АИР);
- $P_{АРЧМ}$ – управляющее воздействие системных АРЧМ, первичное и вторичное регулирования по управляющим воздействиям систем АРЧМ ЭЭС;
- $\rho_{ПП}$ – давление пара на выходе промежуточного пароперегревателя;
- $P_{МУТ}$ – уставка механизма управления турбиной (мощность турбины);
- ρ_T – управляющее воздействие при изменении давления свежего пара.

Гидравлический исполнительный механизм, на вход которого приходит управляющее воздействие n от математической модели АРЧМ, формирует на вход математической модели паровых турбин величину перемещения регулирующего органа турбины t , тем самым определяя значение момента вращения турбины (M_T).

В реализованной в ВМК РВ ЭЭС математической модели АРЧМ все коэффициенты передачи являются программно-изменяемыми, что обеспечивает возможность задания необходимого управляющего воздействия. Так, изменение коэффициента переда-

чи в канале разгрузки быстродействующего контура обеспечивает формирование $P_{AИР}$ согласно приведенному на рис. 2 графику.

Сформированная математическая модель АРЧМ, как и математическая модель агрегата турбина-генератор, реализуется посредством специализированных гибридных процессоров, которые являются основными элементами ВМК РВ ЭЭС [7].

Схема подключения к ВМК РВ ЭЭС реальных систем управления для решения задачи их тестирования и настройки приведена на рис. 3.

Моделирование противоаварийной импульсной и послеаварийной длительной разгрузки турбины блочной тепловой электрической станции

Исследование моделей АИР и послеаварийного автоматического управления (ПАУ) выполнено на примере энергоблока Г-4 (рис. 4). Воспроизведение работы модели АИР и ПАУ осуществляется путем ее предварительной настройки, включающей:

- определение и задание параметров АИР;
- формирование сигнала в центральной системе противоаварийного управления (ЦСПУ) для ПАУ

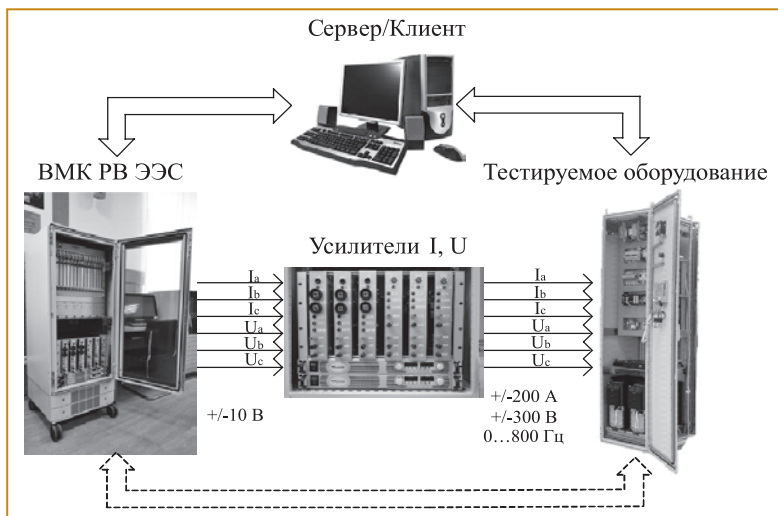


Рис. 3. Схема подключения ВМК РВ ЭЭС к реальным системам управления

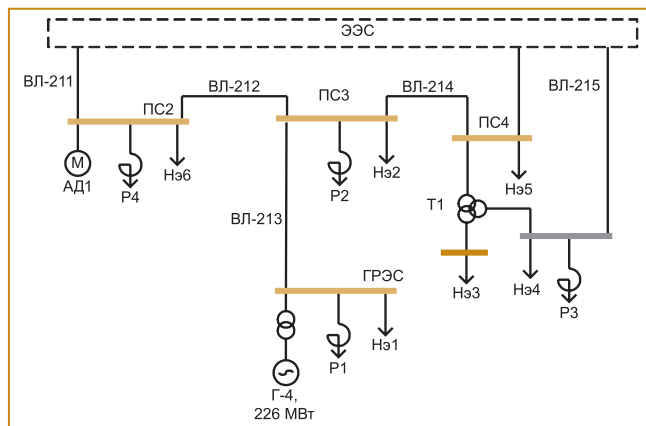


Рис. 4. Схема моделируемого на ВМК РВ ЭЭС энергокластера с учетом прилегающего района ЭЭС

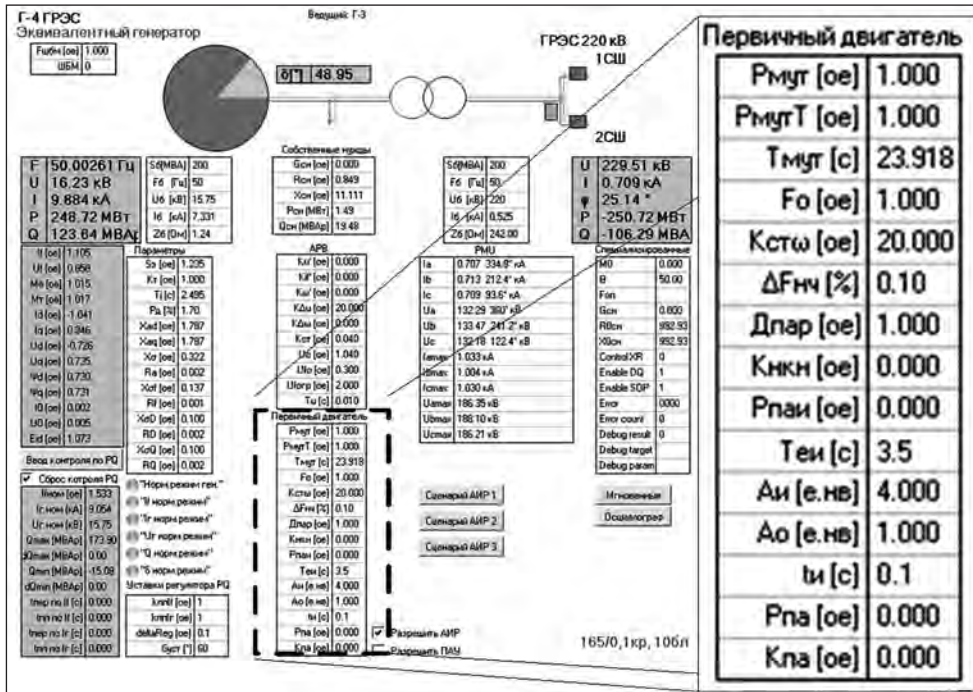


Рис. 5. Динамическая панель наблюдения и управления энергоблока Г-4

в виде значения возникшей в послеаварийном режиме избыточной мощности ($P_{ИЗБ}$), используемой для определения значения мощности турбины после аварийной разгрузки ($P_{ПА}$) согласно следующему выражению:

$$P_{ПА} = P_T - P_{ИЗБ}; \quad (1)$$

где P_T — текущая нагрузка паровой турбины.

Возможности средств гибридного моделирования [5, 6, 7] позволяют осуществить интерактивную настройку параметров моделей АИР и ПАУ при помощи соответствующей таблицы «Первичный двигатель» в представленной на рис. 5 динамической панели наблюдения и управления энергоблока, а также автоматически при помощи специально подготовленных сценариев, запускаемых кнопками «Сценарий АИР и ПАУ» с динамической панели наблюдения и управления энергоблока.

При помощи таблицы «Первичный двигатель» возможна настройка системы противоаварийного управления турбиной заданием параметров:

- A_H — значение управляющего воздействия противоаварийной импульсной разгрузки;
- $P_{ПАИ}$ — значение мощности противоаварийной импульсной разгрузки, задаваемое в пределах $A_H \dots 0$, в соответствии с алгоритмом противоаварийного управления;
- A_0 — значение остаточного управляющего воздействия противоаварийной импульсной разгрузки;
- t_H — времена длительности подаваемого импульса;
- $T_{ЕН}$ — постоянная времени экспоненциального снятия управляющего импульсного воздействия A_0 ;
- $P_{ПА}$ — мощность турбины послеаварийной разгрузки;

• $K_{ПА}$ — коэффициент усиления по каналу послеаварийной разгрузки.

Исследование функционирования моделей АИР и ПАУ на ВМК РВ ЭЭС включает следующие этапы:

1. Выполнение в ВМК РВ ЭЭС сценария динамики, в котором моделируется возникновение аварийного режима и соответствующее ему функционирование релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА).
2. Воспроизведение работы модели ЦСПУ, экспорт сигнала разгрузки турбины от ЦСПУ в модель.
3. Функционирование модели АИР и ПАУ с учетом данных от ЦСПУ:

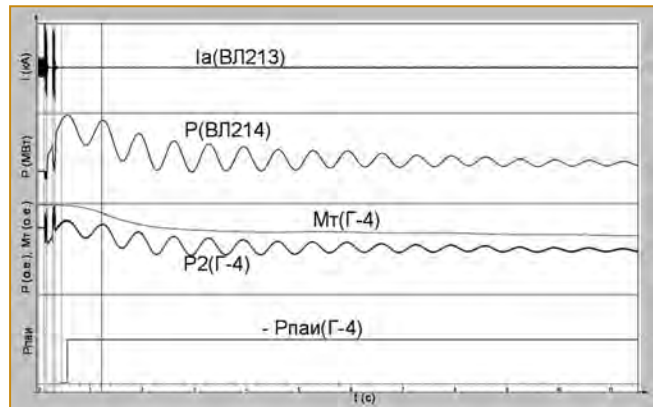


Рис. 6. Осциллограммы процессов при АИР и ПАУ Г-4 на интервале времени 0...12 с при $A_H = 4$ е.н., $A_0 = 0$ е.н., $t_H = 0,1$ с, $T_{ПА} = 0$ с

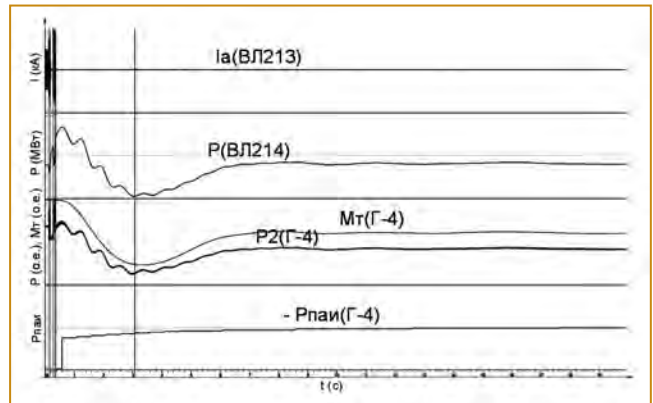


Рис. 7. Осциллограммы процессов при АИР и ПАУ Г-4 на интервале времени 0...20 с при $A_H = 4$ е.н., $A_0 = 1$ е.н., $t_H = 0,2$ с, $T_{ПА} = 3,5$ с

а) присвоение параметру $P_{ПАИ}$ заданной уставки A_{II} в течение времени t_{II} ;

б) изменение значения параметра $P_{ПАИ}$ до значения A_0 , после истечения времени t_{II} и снятие остаточного значения $P_{ПАИ} = A_0$ по экспоненциальному закону с постоянной времени $T_{ЕИ}$;

в) задание настроек ПАУ: значение $P_{ПА}$, согласно выражению (1), а $K_{ПА} = (1-10)$, конкретное значение которого определяется в результате исследований;

г) обнуление $K_{ПА}$ по истечении времени послеаварийного управления.

Представленные ниже результаты исследований по определению настроек эффективного автоматического противоаварийного управления мощностью блочной тепловой электрической станции средствами АИР и ПАУ выполнены для исходного режима работы моделируемого района ЭЭС с учетом его наиболее значимых характеристик по перетокам активной мощности.

Генерируемая Г-4 активная мощность составляет 246 МВт. Связь Г-4 с моделируемым районом ЭЭС осуществляется по линии ВЛ-213 «ГРЭС-ПСЗ». Передаваемая по ВЛ-213 на «ПСЗ» активная мощность 136 МВт распределяется следующим образом: по ВЛ-212 на «Тяговые ПС» передается $P=105$ МВт, по ВЛ-214 на «ПС4» передается $P=31$ МВт.

В рассматриваемом районе ЭЭС, согласно указанным этапам исследования, при помощи сценария динамики моделируется однофазное короткое замыкание на ВЛ-212, последующее действие РЗ, неуспешное автоматическое повторное включение и повторное действие РЗ с ускорением. Следствием указанных действий РЗ и ПА является ослабление связи Г-4 с ЭЭС (отключение ВЛ-212 и увеличение перетока мощности по ВЛ-214). В результате превышения перетока мощности по ВЛ-214 сверх допустимого значения от ЦСПУ подаются сигнал и данные на выполнение противоаварийной разгрузки турбины генератора Г-4.

На рис. 6 представлены осциллограммы процессов при функционировании АИР без плавного снятия остаточного сигнала противоаварийного импульсного управления. В данном случае имеет место некоторое перерегулирование и продолжительные качания в моделируемой ЭЭС.

На рис. 7 предоставлены осциллограммы процессов при настройках АИР и ПАУ Г-4, при которых наблюдается зависимость возрастания глубины разгрузки турбины с увеличением амплитуды и времени импульса. Как видно, при заданных настройках АИР и ПАУ колебания мощности относительно быстро затухают, устойчивость ЭЭС сохраняется.

Результаты экспериментальных исследований разработанных средств всережимного моделирова-

ния АРЧМ, в том числе представленных в данной работе исследований противоаварийного управления мощностью турбин, подтверждают эффективность и достоверность созданных средств и пригодность их использования для определения оптимальных всережимных настроек аварийной автоматики. Кроме того, в рамках выполнения научно-исследовательской работы на базе ВМК РВ ЭЭС были проведены исследования процессов противоаварийной разгрузки энергоблоков Сургутских ГРЭС, в ходе которой были разработаны рекомендации для оптимальной настройки устройств противоаварийного управления мощностью турбин энергоблоков.

Список литературы

1. Прытков Н.И., Федоров В.В., Комаров К.В. и др. Сертификационные испытания энергоблока 215 МВт Псковской ГРЭС на соответствие нормам участия энергоблоков ТЭС в нормированном первичном и автоматическом вторичном регулировании частоты // Теплоэнергетика. 2007. №10. с. 2-7.
2. Биленко В.А., Меламад А.Д., Микушевич Э.Э., Никольский Д.Ю. и др. Разработка и внедрение САРЧМ крупных энергоблоков // Теплоэнергетика. 2008. №10. с. 14-26.
3. D. Qi. Defense schema against large disturbances in China Southern PowerGrid // Electra, vol. 257, pp. 4-16, August 2011.
4. Zhang Yi, Gole A. M., Wu W., Zhang B., Sun H. Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements // IEEE Transaction on power system. 2013. vol.5(1). pp. 357-366,
5. Боровиков Ю.С. Концепция адекватного моделирования интеллектуальных энергосистем // Известия вузов. Электромеханика. 2011. № 6.
6. Боровиков Ю.С., Сулайманов А.О. Информационно-управляющая система мультипроцессорного комплекса моделирования в реальном времени энергосистем // Электротехника. 2013. № 5. С. 56-63.
7. Боровиков Ю.С., Гусев А.С. и др. Адаптируемая математическая модель гидравлических и паровых первичных двигателей и генераторов энергосистем // Электричество. 2012. № 12. С. 66-72.
8. Сулайманов А.О., Андреев М.В., Рубан Н.Ю. Концепция адекватного моделирования релейной защиты и противоаварийной автоматики энергосистем // Электричество. 2012. №. 6 С. 17-20.
9. Андреев М.В., Боровиков Ю.С. Оптимизация уставок дифференциальных защит трансформаторов и автотрансформаторов с помощью их адекватных математических моделей // Современные проблемы науки и образования, 2013. №3. <http://www.science-education.ru/109-9343>.
10. Иванов В.А. Регулирование энергоблоков Л.: Машиностроение, 1982. с. 311.

Юрий Сергеевич Боровиков — д-р техн. наук, заведующий кафедрой электроэнергетических систем, Сулайманов Алмаз Омурзакович — канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Моделирование электроэнергетических систем», Уфа Руслан Александрович — ассистент Энергетического института Томского политехнического университета.
Контактный телефон (3822) 60-62-49, (вн. 3454).
E-mail: hecn@tpu.ru