

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ
МЕЖСИСТЕМНЫХ СВЯЗЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Приводится методика согласованной настройки автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) генераторов и автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) турбин электростанций. Представлена созданная в MATLAB модель гидроэлектростанции, на примере которой показано влияние согласования настроек АРВ и АРЧВ на демпфирование электро-механических колебаний и запас устойчивости межсистемных связей.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, автоматический регулятор возбуждения, автоматический регулятор частоты вращения, генератор, турбина, идентификация, согласованная настройка.

Введение. Постановка задачи. В настоящее время разрабатываются проекты по объединению больших электроэнергетических систем (ЭЭС), таких, как ЭЭС России и ОЭС Европейского Союза, т. е. по созданию мега-энергообъединений. В этих условиях повышается актуальность вопросов регулирования напряжения и реактивной мощности, оптимального распределения нагрузки параллельно работающих генераторов электростанций с целью повышения надежности функционирования ЭЭС.

Основным средством повышения запасов статической устойчивости и улучшения демпфирования электромеханических колебаний традиционно является использование автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) синхронных генераторов. Оптимальная и устойчивая работа ЭЭС зависит от множества факторов, в том числе от выбора настроек АРВ генераторов. Данным вопросом на протяжении многих лет занимаются такие организации как ВЭИ, ВНИИЭ, НИИПТ, ИСЭМ СО РАН, ВНИИЭлектромаш, Энергосетьпроект, Гидропроект, МЭИ, СПбГПУ и многие другие. Однако еще не решены все проблемы, связанные с настройкой систем АРВ совместно с другими регуляторами, влияющими на статическую устойчивость ЭЭС. К таким устройствам в первую очередь нужно отнести автоматические регуляторы частоты вращения (АРЧВ) турбины.

Актуальность данной работы подтверждается также тем, что проблема обеспечения согласованной работы и соответственно настройки систем автоматического регулирования частоты и перетоков мощности по межсистемным связям ЭЭС России и автоматики управления агрегатами гидроэлектростанций послужила причиной создания нового стан-

дарта ОАО «СО ЕЭС», вступившего в силу с 1 июля 2010 г. [1].

Методика согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ. Для определения оптимальных коэффициентов регулирования систем АРВ и АРЧВ авторами предлагается воспользоваться разработанным алгоритмом [2], где используется математическое описание ЭЭС, полученное на основе экспериментальной информации (рис. 1). Согласно данному алгоритму, необходимо иметь математическую модель в виде характеристического полинома, отражающего динамические свойства исследуемой ЭЭС (рис. 1, пункт 3). Для этого используется метод непараметрической идентификации [3], при котором система рассматривается как «черный ящик», и на базе априорной информации о процессе определяются частотные характеристики (ЧХ).

Для определения рабочего диапазона частот исследуемой ЭЭС, называемого «полосой пропускания», можно использовать метод, основанный на волновом подходе [4]. Полоса пропускания ЭЭС определяется как сумма отдельных составляющих собственных колебаний различных мод свободного движения, каждое из которых зависит от жесткости связей отдельного генератора с системой и от частоты собственных колебаний:

$$\Omega_i = 2\omega_{pi} \cdot \sin(\varphi_i / 2) \cdot \sqrt{\frac{K_i}{1 + 4K_i \cdot \sin^2(\varphi_i / 2)}}$$

где $\omega_{pi} = \frac{\sqrt{\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_{Gi}} \cdot \omega_0}}{2\pi} \cdot T_{j\partial k}$ – парциальная частота (частота собственных колебаний ротора i -го генератора) [Гц]; $\frac{\partial P_{Gi}}{\partial \delta_{Gi}}$ – синхронизирующая

* - автор, с которым следует вести переписку.

мощность генератора, которая определяется как $P_c = \frac{E_{qi} \cdot U_{\Gamma i}}{X_{d\Sigma i}} \cdot \cos \delta_i$ [о.е.]; $\omega_0 = 314$ [рад/с] – номинальная частота вращения ротора генератора; $T_{j\text{эк}}$ – эквивалентная постоянная механической инерции системы [с]; φ_i – волновое число (изменение фазы пространственной гармоники между двумя смежными узлами цепочечной схемы) [рад].

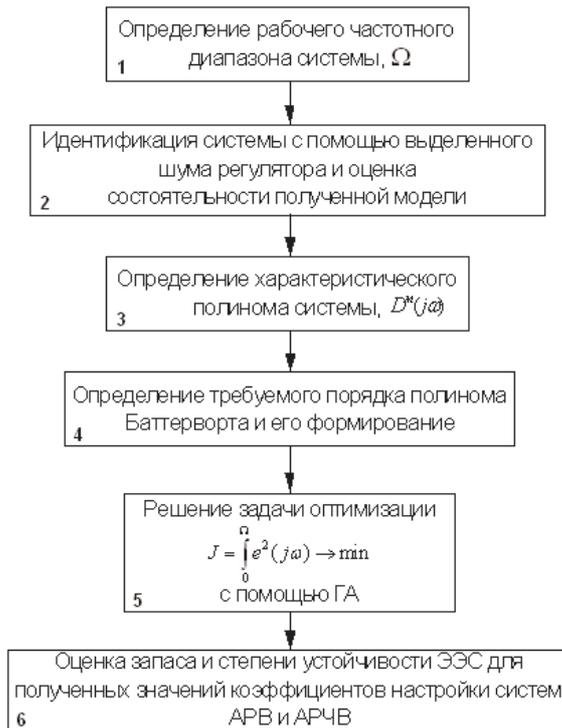


Рис. 1. Алгоритм оптимальной настройки систем АРВ и АРЧВ.

Для цепочечной однородной схемы при наличии шин бесконечной мощности только с одного конца волновое число определяется как $\varphi_i = \frac{(i-0,5) \cdot \pi}{N+0,5}$; $K_i = \frac{U_S \cdot X_{di}}{E_{qi} \cdot X_{d\Sigma i}}$ – коэффициент относительной жесткости связей i -го генератора с системой [о.е.]; X_{di} – индуктивное сопротивление генератора по продольной оси [о.е.]; $X_{d\Sigma i} = X_{di} + X_{BH}$ – общее сопротивление связи генератора и внешней сети; U_S – напряжение на шинах системы.

В соответствии с представленным алгоритмом оптимальной настройки систем АРВ и АРЧВ (рис. 1, пункт 5), необходимо иметь определенный критерий оптимизации, который позволит определить настройки, обеспе-

чивающие требуемые параметры переходного процесса и необходимый запас устойчивости. Для этого предлагается минимизировать следующий квадратичный критерий:

$$J = \int_0^{\Omega} e^2(j\omega) d\omega \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $e(j\omega) = D^{жс}(j\omega) - D^M(j\omega)$ – рассогласование между желаемым набором значений $D^{жс}(j\omega)$ и модельным набором $D^M(j\omega)$ коэффициентов характеристических полиномов; ω – текущее значение частоты из диапазона «полосы пропускания» ЭЭС.

В связи с тем, что величина рассогласования $e(j\omega) = \text{Re}_e(\omega) + j \text{Im}_e(\omega)$ определяется последовательностью комплексных значений, возникает трудность минимизации функционала (1). В силу этого задачу оптимизации (1) необходимо рассматривать как двухкритериальную, на основе линейной свертки с одинаковой относительной важностью частных критериев:

$$J = \frac{1}{2} J_{\text{Re}} + \frac{1}{2} J_{\text{Im}} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где J_{Re} – критерий, характеризующий близость модельного и желаемого годографов в области действительных значений, а J_{Im} – критерий, характеризующий близость годографов в области мнимых значений.

Частные критерии J_{Re} и J_{Im} формируются на основе суммы квадратичных отклонений собственных значений и определяются выражениями:

$$J_{\text{Re}} = \int_0^{\Omega} (\text{Re } D^{жс}(\omega) - \text{Re } D^M(\omega))^2 d\omega, \quad (3)$$

$$J_{\text{Im}} = \int_0^{\Omega} (\text{Im } D^{жс}(\omega) - \text{Im } D^M(\omega))^2 d\omega.$$

Задачу определения минимального значения функционала (2) и, следовательно, частных критериев (3), можно отнести к классу многокритериальных и многомерных задач. В то же время функционал (2) представляет собой сложную функцию, имеющую множество локальных экстремумов, среди которых требуется найти единственный глобальный или близкий к нему, что трудно, а иногда невозможно достичь с помощью классических методов оптимизации. В связи с этим для решения представленной задачи используется современный метод оптимизации – генетический алгоритм.

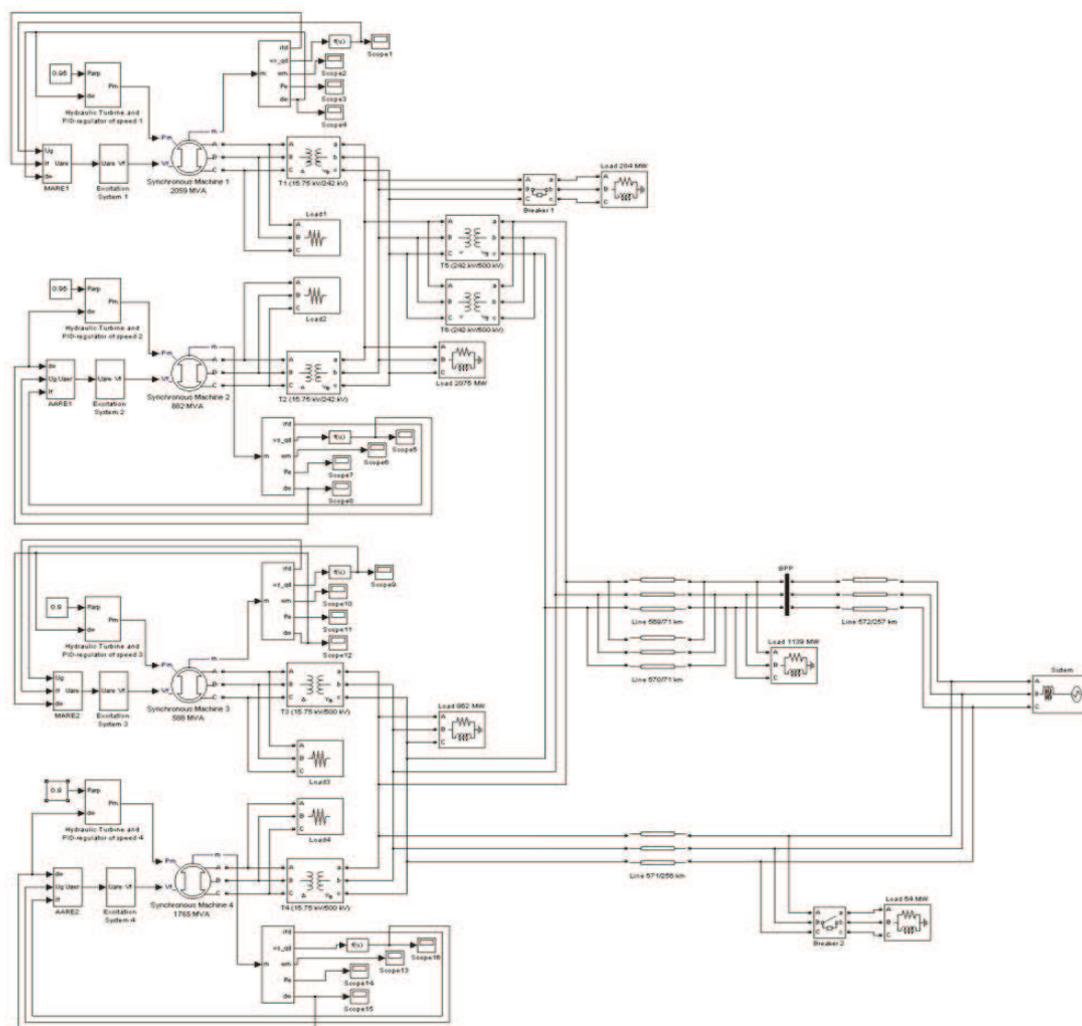


Рис. 2. Модель электростанции в MATLAB.

Описанный алгоритм был реализован в программном комплексе [5], который использовался для исследования влияния оптимальных настроек АРВ и АРЧВ на устойчивость межсистемных связей электроэнергетических систем.

Апробация методики и анализ результатов исследования. Исследование предлагаемой методики повышения запаса устойчивости межсистемных связей ЭЭС за счет согласованной настройки АРВ и АРЧВ проводилось на созданной в среде MATLAB модели гидроэлектростанции, работающей параллельно с системой [6]. Схема модели энергосистемы показана на рис. 2. На станции имеются два уровня напряжения: 220 кВ и 500 кВ, соединенные трансформаторной связью. К системе шин 220 кВ присоединены семь эквивалентных энергоблоков, гидрогенератор-трансформатор с АРВ-М (микропроцес-

сорный) и три энергоблока с АРВ-СДП (полупроводниковый). К системе шин 500 кВ подключены два энергоблока с АРВ-М и шесть энергоблоков с АРВ-СДП. Генераторы электростанции снабжены системами тиристорного возбуждения, а также регуляторами типа АРВ-СДП (блок ААРЕ) и АРВ-М (блок МАРЕ). Модель турбины с АРЧВ создана в MATLAB с помощью пакета расширения Simulink. При этом АРЧВ моделируется электрогидравлическим регулятором типа ЭГР-2И с ПИД-законом управления. От шин 500 кВ отходят линии связи с системой (Line 569, 570, 571, 572), образующие в совокупности кольцо.

Полученные в результате идентификации частотные модели турбины и генератора в виде амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) показаны на рис. 3. После этого, согласно описанному выше алгоритму, были

определены настройки систем АРВ с учетом влияния АРЧВ. Например, для системы 500 кВ настройки АРВ-СДП в относительных единицах следующие: $k_{0u}=1$, $k_{1u}=0.97$, $k_{0\omega}=0.64$ и $k_{1\omega}=0.17$, а АРВ-М – $k_{0u}=50$, $k_{1u}=0.16$, $k_{0\omega}=5.67$ и $k_{1\omega}=1.58$. Необходимо отметить, что поиск коэффициентов стабилизации осуществлялся в ограниченном диапазоне, характерном для реальных систем АРВ, при фиксированных значениях k_{0u} .

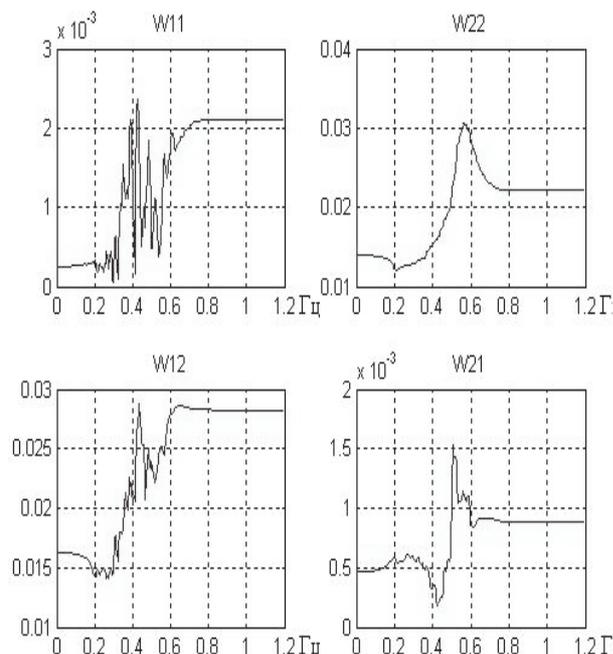


Рис. 3. АЧХ системы «турбина-генератор».

Настроенные таким образом АРВ и АРЧВ обеспечивают приемлемое демпфирование электромеханических колебаний системы, что видно из фрагментов осциллограмм изменения частоты вращения ротора и напряжения синхронных генераторов при вносимых возмущениях в систему (рис. 4).

Для определения влияния предлагаемой методики согласованной настройки АРВ и АРЧВ на пропускную способность электропередачи по ВЛ 569/570, согласно методическим указаниям по устойчивости энергосистем [7], осуществлялось утяжеление режима путем последовательного увеличения перето-

ка для рассматриваемого сечения. При этом использовался сбалансированный по мощности способ утяжеления режима, при котором частота оставалась практически неизменной, что позволило достичь границы области устойчивости и определить предел электропередачи.

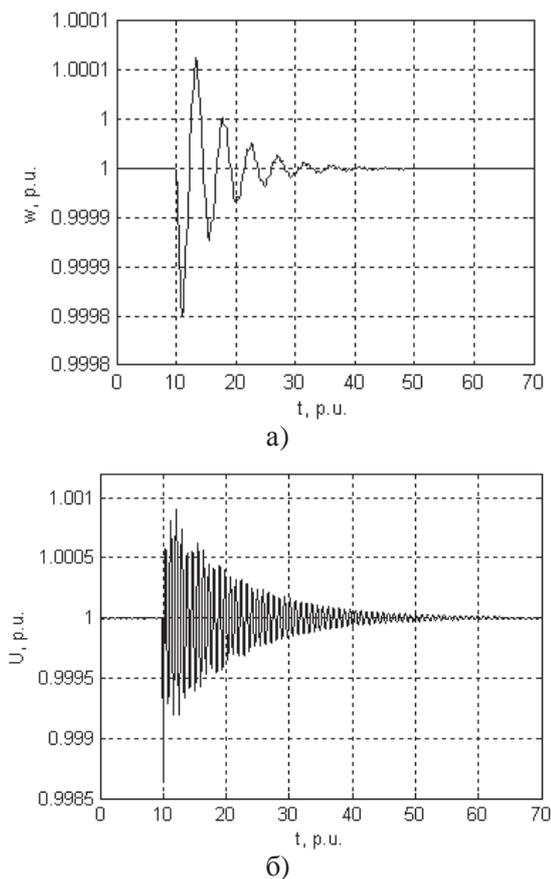


Рис. 4. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора (а) и напряжения (б) синхронных генераторов.

По результатам изменения перетока мощности и частоты для различных способов настройки АРВ (рис. 5) был определен коэффициент запаса статической устойчивости по активной мощности в сечении. При настройке АРВ без учета влияния АРЧВ коэффициент составил $K_{зап}=26\%$, а при согласованной настройке – $K_{зап}=32\%$.

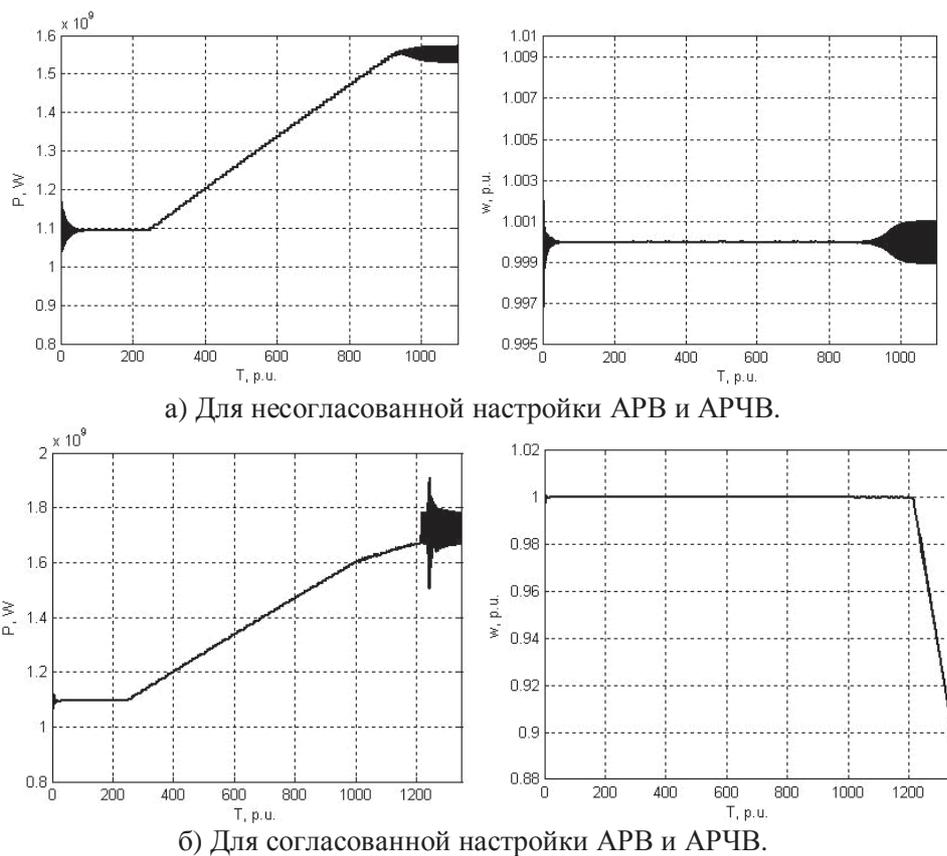


Рис. 5. Определение предела передаваемой мощности по сечению.

Выводы. Таким образом, как показали исследования на модели электростанции в MATLAB, предлагаемая методика согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ улучшает демпфирование электромеханических колебаний в ЭЭС и повышает запас статической устойчивости межсистемных связей.

Литература

1. Обеспечение согласованной работы систем автоматического регулирования частоты и перетоков мощности ЭЭС России и автоматики управления мощностью гидроэлектростанций. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования: СТО 59012820.29.240.002-2010.
2. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2009. №1(21). С. 150-153.
3. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Определение оптимальных коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ по непараметрическим моделям турбогенераторов электростанций // *Системы. Методы. Технологии.* 2009. №3. С. 70-74.
4. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. *Динамические свойства энергосистем.* М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
5. Оптимизация коэффициентов стабилизации систем АРВ и АРЧВ генераторов электростанций (ARE&ARRF v. 1.00): программа для ЭВМ / Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Св. ГР № 2010615862; зарег. в реестре 08.09.10. Федер. службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
6. Булатов Ю.Н., Игнатъев И.В. Модель электростанции в MATLAB для исследования внутригруппового движения // *Моделирование и информационные технологии: сб. науч. тр. (спец. вып.).* Киев: НАН Украины, 2010. Т.1. С. 194-202.
7. Методические указания по устойчивости энергосистем: СО-153-34.20.576-2003: утв. приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 277.