

то полином $f(z)$ является стандартным полиномом степени n .

Покажем, что этот полином не имеет чисто мнимых корней. Предположим противное, т. е. полином $f(z)$ имеет мнимый корень $i\beta$, тогда справедливо равенство

$$\alpha^2(i\beta)^2 f(i\beta) = -(1-i\alpha\beta)F(i\beta) + F(-i\beta). \quad (19)$$

Отсюда

$$|1-i\alpha\beta| \cdot |F(i\beta)| = |F(-i\beta)|. \quad (20)$$

Разделим обе части этого равенства на $|F(i\beta)| = |F(-i\beta)| > 0$ величину, по условию леммы отличную от нуля, и возведем обе части полученного соотношения в квадрат. Получим $1 + \alpha^2\beta^2 = 1$. Так как $\alpha > 0$, это тождество может выполняться только при $\beta = 0$, т. е. $f(i\beta) = f(0) = 0$. Это противоречит тому, что $f(z)$ является стандартным полиномом. Итак, мы пришли к противоречию с предположением о наличии у полинома $f(z)$ чисто мнимых корней. Из

замечания 2 и того, что присоединенный к нему полином является полиномом Гурвица, вытекает, что полином $f(z)$ также является полиномом Гурвица. Лемма доказана.

Выводы. В статье даются критерии асимптотической устойчивости линейных стационарных систем.

Литература

1. Андреев Ю.Н. Управление конечномерными линейными объектами. М.: Наука, 1976.
2. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Высш. школа, 1967. 472 с.
3. Зубов А.В., Зубов Н.В., Лаптинский В.Н. Динамика управляемых систем. СПб.: ВВМ, 2008. 336 с.
4. Зубов А.В., Зубов Н.В. Динамическая безопасность управляемых систем. СПб.: Изд-во НИИ Химии: СПбГУ, 2009. 172 с.

УДК 621.879

Ю.Н. Булатов*, И.В.Игнатъев

ВЛИЯНИЕ СОГЛАСОВАННОЙ НАСТРОЙКИ СИСТЕМ АРВ И АРЧВ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Описываются методы непараметрической идентификации электроэнергетической системы (ЭЭС) с учетом связанности отдельных ее частей. Приводится методика согласованной настройки систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) группы параллельно работающих генераторов электростанции. Для настройки АРВ и АРЧВ предлагается алгоритм приближения коэффициентов характеристического полинома ЭЭС к стандартным формам Баттерворта с применением современной методики оптимизации – генетического алгоритма. Представлена модель ЭЭС, созданная в MATLAB, на примере которой показано хорошее демпфирование электромеханических колебаний при настройке регуляторов предложенным методом.

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

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) характеризуются большой протяженностью, огромным числом потребителей электроэнергии. Нагрузки потребителей, как правило, имеют случайный характер изменения, что может привести к отклонению частоты промышленного тока от номинального значения. Первичное регулирование частоты на энергоблоках электрических станций осуществляется с помощью автоматических регуляторов частоты вращения (АРЧВ) турбин путем изменения впуска энергоносителя и, соответственно, выдаваемой в систему активной мощности. Однако изменение генерируемой мощности, в свою очередь, вызывает изменение напряжения на зажимах генератора. Регулирование напряжения на электростанциях осуществля-

ется с помощью автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) генераторов путем изменения напряжения на обмотке возбуждения и, соответственно, вырабатываемой реактивной мощности. Таким образом, регулирование частоты неразрывно связано с регулированием мощности и напряжения генераторов электростанций.

Устойчивая работа ЭЭС зависит от множества факторов и, в том числе, от выбора настроек АРВ генераторов. Данным вопросом на протяжении многих лет занимались и занимаются многие известные отечественные ученые, однако проблемы, связанные с согласованием настроек систем АРВ и АРЧВ, в полной мере до сих пор не решены.

В практике эксплуатации ЭЭС сложилось так, что подсистемы управления генератором и турби-

* - автор, с которым следует вести переписку.

ной рассматривались при их настройке как не связанные. Хотя, с другой стороны, еще более 20 лет назад в своих работах профессор В.А. Веников указывал на необходимость именно взаимосвязанного управления [1]. В данной работе приводится метод согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ, учитывающий их взаимное влияние, а также делается сравнительный анализ с результатами настройки систем АРВ без учета влияния АРЧВ.

Необходимо также отметить, что при настройке систем АРВ и АРЧВ большое значение имеет достоверность математических моделей элементов ЭЭС. Для этой цели традиционно используется классическая модель, основанная на уравнениях Парка-Горева. Однако этот математический аппарат является неэффективным и громоздким, особенно когда приходится учитывать группы параллельно работающих генераторов электростанций в сложной ЭЭС. В связи с этим предлагается формировать математические модели на основе экспериментальных частотных характеристик (ЧХ) [2]. В данной работе для получения ЧХ используется метод непараметрической идентификации, основанный на преобразовании Фурье входных и выходных сигналов системы.

Непараметрические модели в виде ЧХ позволяют по экспериментальным данным «вход – выход» выявить динамические свойства системы, оценить качество переходного процесса и запасы устойчивости. В интегрированной среде MATLAB авторами был программно реализован алгоритм, позволяющий проводить непараметрическую идентификацию ЭЭС по входным и выходным сигналам [3].

Идентификацию и согласованную настройку систем АРВ и АРЧВ группы параллельно работающих генераторов электростанции предлагается проводить в два этапа (рис. 1). Здесь необходимо отметить, что если рассматривается группа агрегатов, работающих на общие шины, то они, как правило, являются однотипными, т. е. одинаковыми по своим конструктивным данным и, следовательно, характеризуются близкими динамическими свойствами. При этом для устойчивости однотипной связанной системы необходимо и достаточно, чтобы были устойчивы все n однотипные системы. Это обстоятельство позволяет переходить к рассмотрению такой системы как эквивалентной, что дает возможность существенно снизить порядок характеристического уравнения системы. Для этого авторами предлагается выбирать один из параллельно работающих агрегатов в качестве «ведущего» и представлять эквивалентную систему так, как показано на рис. 2.

Передаточные функции генератора W_G и турбины W_T предлагается определять экспериментально в виде ЧХ, как отношения спектров выходных и входных сигналов соответствующих

звеньев с помощью алгоритма, реализованного в MATLAB [3].

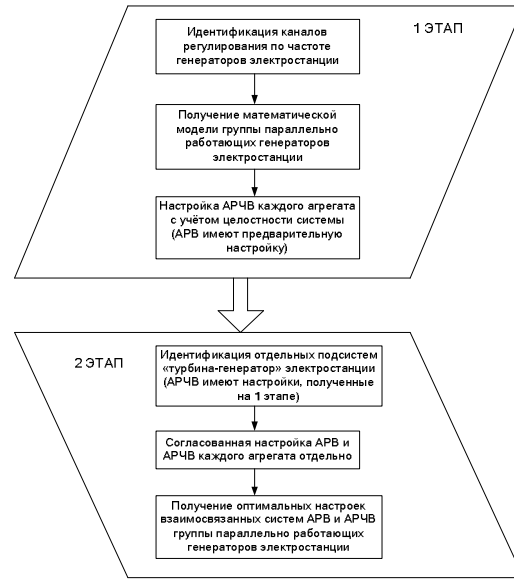


Рис. 1. Схема идентификации и согласованной настройки систем АРВ и АРЧВ.

В реальных системах для идентификации можно использовать выделенный шум регуляторов. Передаточные функции АРЧВ предлагается представлять в комплексном виде с неизвестными коэффициентами настройки.

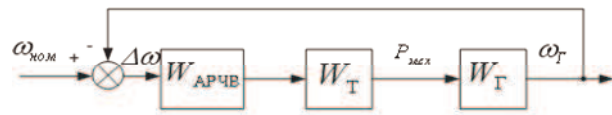


Рис. 2. Структурное представление эквивалентной системы группы параллельно работающих генераторов электростанции.

Если на электростанции имеется несколько систем шин, т. е. можно выделить несколько групп параллельно работающих агрегатов, то для идентификации такой системы на первом этапе ее необходимо представить как многосвязную, например, так, как показано на рис. 3, и использовать метод, основанный на получении уравнений для нескольких режимов [4].

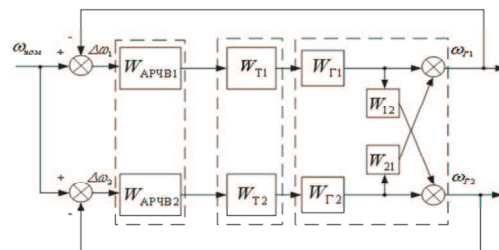


Рис. 3. Структурное представление двух связанных систем регулирования частоты.

После идентификации и получения характеристического полинома рассматриваемой эквивалентной системы регулирования частоты можно осуществлять настройку АРЧВ всех агрегатов. Для этого авторами предлагается воспользоваться разработанным ранее алгоритмом [5], в основе которого лежит метод стандартных коэффициентов, позволяющий приблизить коэффициенты характеристического полинома исследуемой системы к стандартным (желаемым) формам, априори обладающим требуемыми параметрами переходного процесса и необходимым запасом устойчивости. В качестве таких желаемых наборов коэффициентов хорошо подходят полиномы Баттерворта. Определение оптимальных коэффициентов настройки АРЧВ производится путем решения задачи оптимизации с помощью генетического алгоритма (ГА), сводящего к минимуму следующий квадратичный критерий:

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

где $e(j\omega) = D^*(j\omega) - D^m(j\omega)$ – рассогласование между желаемым набором значений $D^*(j\omega)$ и модельным набором $D^m(j\omega)$ характеристических полиномов.

Выбор ГА как средства решения задачи оптимизации обусловлен тем, что критерий (1) в данном случае представляет собой сложную функцию, имеющую множество локальных экстремумов. При этом главным достоинством ГА, как известно, является возможность получения с его помощью глобального решения, чего трудно, а иногда невозможно достичь с помощью классических методов оптимизации.

Алгоритм настройки АРЧВ рассматриваемой системы показан на рис. 4.

На втором этапе предлагаемой методики согласования настроек АРВ и АРЧВ группы параллельно работающих генераторов необходимо провести идентификацию отдельных подсистем «турбина – генератор» электростанции с настройками АРЧВ, полученными на первом этапе. Для этого используется метод непараметрической идентификации системы «турбина – генератор» [4]. Согласно этому методу систему «турбина-генератор» в виде отдельного блока на электростанции нужно представить как двухсвязную, имеющую два входных воздействия, поступающих от регуляторов, и, в общем случае, две регулируемые величины – частоту вращения ротора ω_r и напряжение генератора U_r (рис. 5).

На рис. 5 обозначены передаточные функции следующих устройств: генератора W_r , турбины W_t , возбудителя W_b , автоматического регулятора

частоты вращения $W_{АРЧВ}$, автоматического регулятора возбуждения $W_{АРВ}$.

Для идентификации системы «турбина – генератор» в условиях эксплуатации необходимо снимать входные и выходные сигналы для нескольких режимов с целью получения необходимого количества уравнений, равного числу неизвестных.

Предположим, что передаточные функции АРВ, АРЧВ, турбины и возбудителя известны (их также можно определить экспериментально).

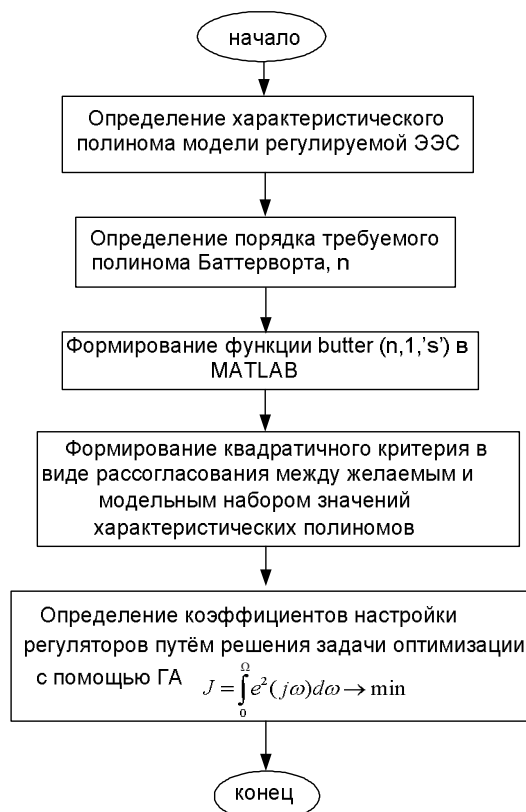


Рис. 4. Алгоритм настройки АРЧВ.

Тогда необходимо определить лишь матричную передаточную функцию генератора. Обозначим через y_1, y_2 спектры входных сигналов, а через x_1, x_2 – спектры выходных сигналов. В рассматриваемой системе достаточно снять спектры входных и выходных сигналов для двух режимов и получить в итоге две системы уравнений:

$$1\text{-й режим: } \begin{cases} x_1 = W_{11} \cdot y_1 + W_{21} \cdot y_2, \\ x_2 = W_{12} \cdot y_1 + W_{22} \cdot y_2 \end{cases};$$

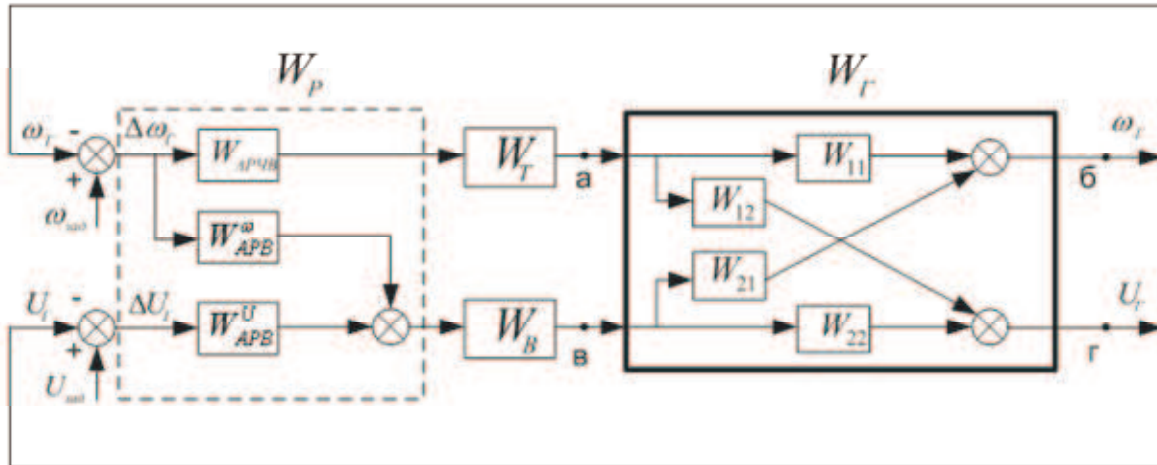


Рис. 5. Структурное представление регулируемой системы «турбина – генератор».

2-й режим:
$$\begin{cases} x'_1 = W_{11} \cdot y'_1 + W_{21} \cdot y'_2, \\ x'_2 = W_{12} \cdot y'_1 + W_{22} \cdot y'_2. \end{cases}$$

Из этих четырех уравнений определяются комплексные передаточные функции основных каналов W_{11} , W_{22} и перекрестных связей W_{12} , W_{21} . Далее, используя полученную матричную передаточную функцию генератора, можно получить характеристический полином регулируемой системы.

После определения характеристических полиномов отдельных регулируемых подсистем «турбина-генератор» можно проводить согласованную настройку систем АРВ и АРЧВ по разработанному алгоритму (рис. 4).

Необходимо отметить, что достоверную математическую модель группы генераторов электростанции можно получить при правильном выборе рабочего диапазона частот системы, называемого «полосой пропускания». Для этого предлагается использовать известный метод, основанный на волновом подходе [6].

Запас устойчивости ЭЭС будем оценивать по показателю скорости изменения фазы характеристического годографа системы [7]:

$$V(\omega) = \left[\frac{d\varphi_D(\omega)}{d\omega} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\varphi_D(\omega)$ – фазово-частотная характеристика (ФЧХ), определяемая по частотному годографу системы $D(j\omega)$.

Вблизи резонансных частот, в том числе и при $\omega = 0$, характеристика (2) определяет действительную часть некоторого эквивалентного корня. При этом, как отмечается в [7], оценка (2) при частоте, равной нулю, позволяет характеризовать удаленность системы от границы устойчивости и определять запас аperiodической устойчивости ЭЭС.

Апробация предложенной методики непараметрической идентификации группы генераторов и настройки взаимосвязанных систем АРВ и АРЧВ проводилась в интегрированной среде MATLAB на созданных моделях ЭЭС, представляющих из себя одно- и двухмашинные системы, работающие на шины бесконечной мощности. Схема модели двухмашинной системы в MATLAB показана на рис. 6. Данная модель состоит из различных блоков силовых элементов, реализованных в пакете SimPowerSystems. Модели гидротурбин, АРВ и АРЧВ были созданы авторами с помощью пакета Simulink [8].

Два агрегата, работающие на общие шины, были заменены одним эквивалентным, для которого были получены ЧХ турбины и генератора, после чего были определены соответствующие настройки АРЧВ. Затем, после идентификации системы «турбина – генератор», результаты которой в виде амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) показаны на рис. 7, были получены оптимальные настройки взаимосвязанных систем АРВ и АРЧВ.

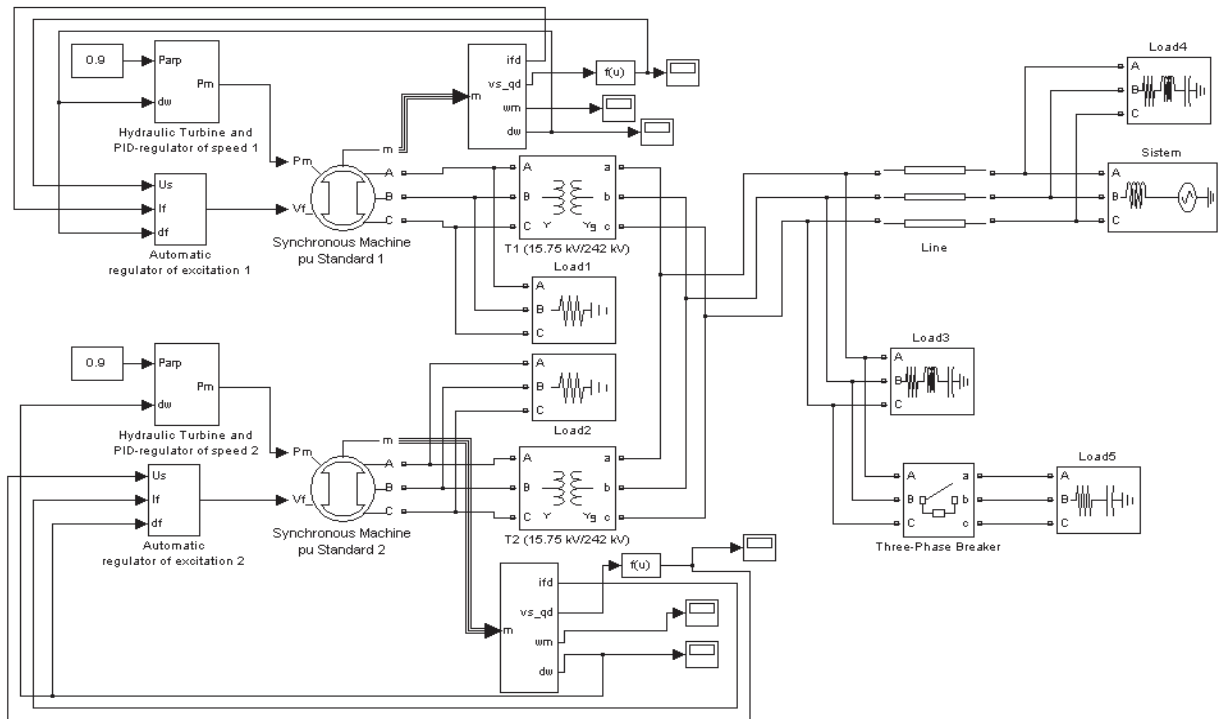


Рис. 6. Схема модели двухмашинной системы в MATLAB.

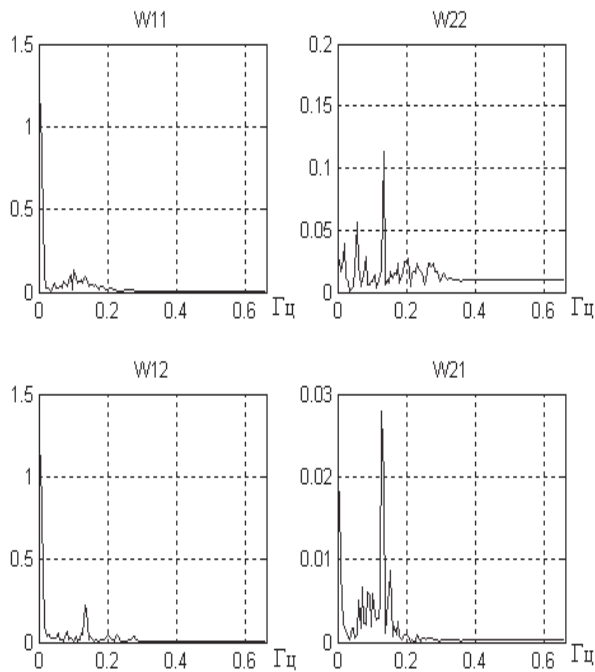


Рис. 7. АЧХ системы «турбина – генератор».

Анализ степени устойчивости ЭЭС, полученной при согласованной настройке АРВ и АРЧВ и без учета согласования, показывает, что в первом случае, как видно из таблицы 1, ЭЭС имеет больший запас устойчивости.

Таблица 1

Степень устойчивости ЭЭС при различных настройках АРВ

Используемый метод настройки АРВ	Коэффициенты настройки АРВ	Запас аperiodической устойчивости ЭЭС, $V(0)$
Без учета влияния АРЧВ	$k_{0u} = 55,$ $k_{1u} = 5,$ $k_{0\omega} = 2.65,$ $k_{1\omega} = -0.88$	0.1295
Согласованная настройка с АРЧВ	$k_{0u} = 177.54,$ $k_{1u} = 5.97,$ $k_{0\omega} = 1.07,$ $k_{1\omega} = 0.72$	0.2298

Кроме этого, улучшились демпферные свойства системы, что видно из фрагментов осциллограмм изменения частоты вращения ротора и напряжения синхронных генераторов при изменении нагрузок потребителей (рис. 8).

Как показали исследования на модели двухмашинной системы в MATLAB, предложенная методика согласованной настройки взаимосвязанных систем АРВ и АРЧВ группы параллельно работающих генераторов электростанции позволяет повысить запас аperiodической устойчивости и демпферные свойства электроэнергетической системы.

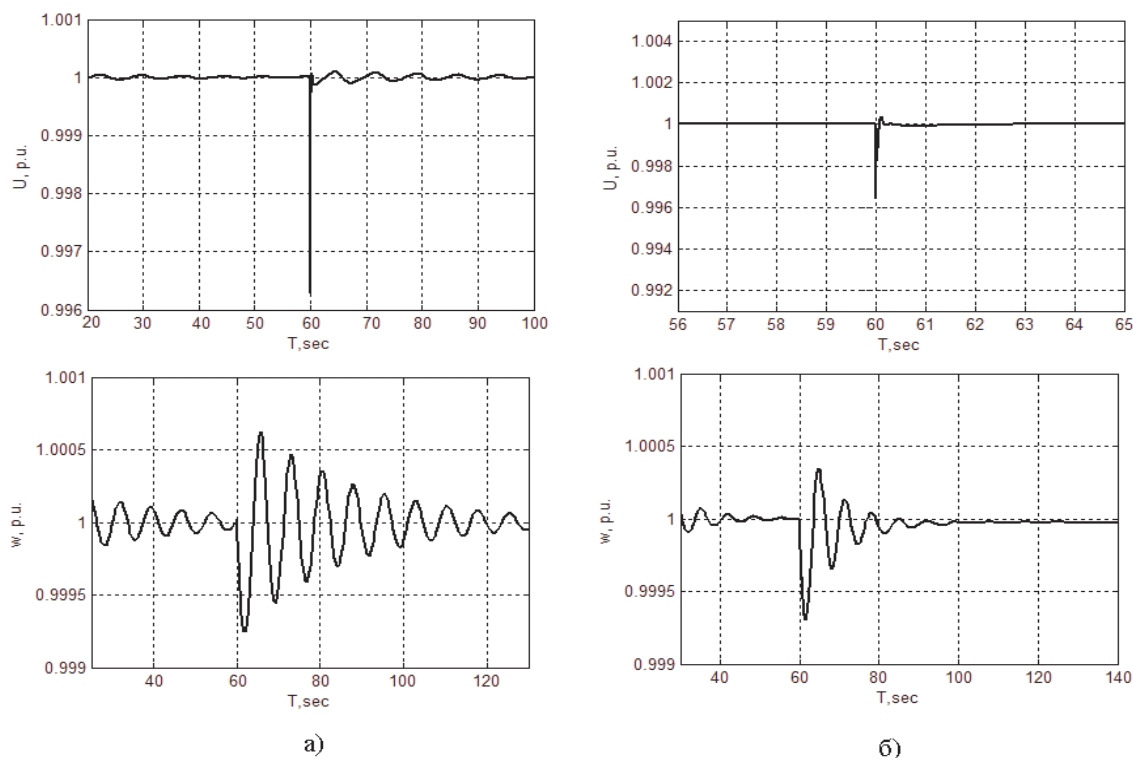


Рис. 8. Осциллограммы изменения частоты вращения ротора и напряжения генератора: а) АРВ настроены без учета влияния АРЧВ; б) согласованная настройка АРВ с АРЧВ.

Литература

1. Веников В.А., Зуев Э.Н., Портной М.Г. и др. Электрические системы: Управление переходными режимами электроэнергетических систем: Учебник. – М.: Высш. школа, 1982. – 247 с.
2. Методика координации настроек АРВ-СД в энергосистемах на основе экспериментальных данных / И.А. Груздев, М.М. Екимов, А.Н. Дойников, И.В. Игнатьев // Труды / Ленингр. политехн. ин-т. 1988. № 427. С. 55-61.
3. Булатов Ю.Н., Дьяконица С.А. Алгоритм непараметрической идентификации ЭЭС для получения оптимальных коэффициентов стабилизации АРВ генераторов // Труды / Брат. гос. ун-т. Сер. Естественные и инженерные науки – развитие регионов Сибири. 2009. Т.1. С. 7–11.
4. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Непараметрическая идентификация системы турбина-генератор в условиях эксплуатации // Идентификация, измерение характеристик и имитация слу-

- чайных сигналов (состояние, перспективы развития): сб. материалов конф. Новосибирск, 2009. С. 89–92.
5. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Оптимизация коэффициентов регулирования системы АРЧМ с использованием генетического алгоритма // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. №1(21). С. 150-153.
6. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 320 с.
7. Бушуев В.В. Динамические свойства электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
8. Булатов Ю.Н., Игнатьев И.В. Моделирование автоматических регуляторов возбуждения генераторов электрических станций в среде MATLAB // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: межвуз. темат. сб. тр. / СПбГАСУ. СПб., 2008. Вып.14. С. 18–24.