

# СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМПЛЕКСНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 621.316.726

**И.В. ДРЁМИН**

Институт общей энергетики НАН Украины, г. Киев

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ С РЕГУЛИРУЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

*Произведены исследования математической модели переходных процессов и их регулирования в Объединенной энергосистеме (ОЭС) Украины с традиционной автоматической системой регулирования частоты и мощности. Выявлены основные параметры пропорционального, пропорционально-дифференциального и пропорционально-интегрально-дифференциального законов регулирования.*

*Ключевые слова:* энергосистема, автоматическая система, регулирование частоты, закон регулирования

Традиционная автоматическая система регулирования частоты и мощности (АРЧМ) является механизмом регулирования реакции электроэнергосистемы на возникающие возмущения. Общепринятая мировая практика решения задач регулирования энергосистем заключается во вводе/выводе дополнительных, замещающих мощностей – регулирующих генераторов. Их регулирование осуществляется в соответствии с законом регулирования, представляющим собой математическую зависимость между управляющим воздействием и отклонением частоты.

Технико-экономические показатели качества функционирования АРЧМ зависят, прежде всего, от вида и параметров используемого закона регулирования. Определение же и выбор наиболее эффективного закона (в соответствии с выбранными показателями качества) возможен только при помощи сравнительного анализа различных законов регулирования. Причем натурные эксперименты в ОЭС требуют существенных затрат и длительного времени, поэтому сравнительный анализ возможен на основе математического моделирования процесса регулирования.

Для исследования основных видов законов регулирования необходимо оценить их эффек-

тивность в соответствии с показателями качества. Все необходимые исследования осуществимы путем численного моделирования соответствующей математической модели. При этом в качестве исходных параметров математической модели приняты параметры, соответствующие ОЭС Украины.

Переходные процессы в энергосистеме характеризуются своей скоротечностью, что обуславливает жесткие требования к динамичности процесса регулирования. С другой стороны, процесс ввода/вывода замещающих мощностей генерации является достаточно инерционным. Согласно действующим нормативам, для ОЭС Украины частота в системе должна быть на уровне  $50 \pm 0,2$  Гц, тогда как, согласно требованиям объединения европейских энергосистем ENTSO-E, этот же показатель составляет  $50 \pm 0,02$  Гц. При аварийном отключении, например, блока АЭС мощностью 1 млн кВт частота в энергосистеме уменьшится на величину, многократно превышающую допустимое значение ( $\pm 0,2$  Гц). В системе возникнет переходный процесс, что может вызвать распад энергосистемы с катастрофическими экономическими и социальными последствиями.

**Эквивалентная модель ОЭС Украины.** В данной работе при исследовании математической модели ОЭС Украины с АРЧМ, приведенной в [1], используется прием “эквивалентного

© И.В. ДРЁМИН, 2011

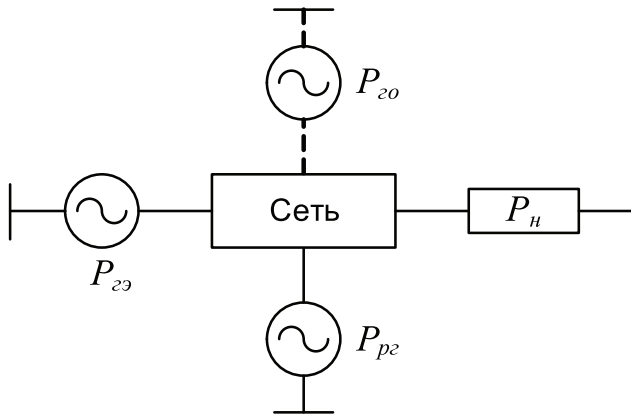


Рис. 1. Схема автоматического регулирования частоты и мощности

генератора”. Это позволяет упростить анализ модели без ущерба качеству оценки. Для оценки же эффективности АРЧМ осуществляется последовательное исследование этой модели с различными видами законов регулирования.

Применение приема “эквивалентного генератора” заключается в сведении всех энергоблоков к одному с соответствующим эквивалентированием переменных и констант. Аналогичный прием используется по отношению к нагрузке и регулирующим генераторам. То есть расчетная математическая модель состоит из эквивалентных генератора, нагрузки, регулирующего генератора и генератора, отключаемого в начальный момент времени (рис. 1).

**Начальные условия.** Аварийное отключение генерирующей мощности  $P_{20} = 1000$  МВт (образование дефицита электрической мощности) происходит в нулевой момент времени. В качестве исходных, условно-постоянных параметров модели приняты значения, приведенные ниже.

Общесистемные параметры:

$f_0 = 50$  Гц – номинальная частота в системе;

$P_{20} = 1000$  МВт – мощность аварийно отключающегося генератора;

$P_{\Sigma} = 3 \cdot 10^3$  МВт – потери активной мощности в сетях, принятые постоянными на протяжении всего исследуемого переходного процесса.

Параметры эквивалентного генератора:

$P_{23,0} = 26 \cdot 10^3$  МВт – начальная мощность;

$T_{\zeta} = 50$  МВт·с<sup>2</sup> – эквивалентная постоянная инерции движущихся частей оборудования, связанного с ротором;

$\tau_{\zeta} = 10$  с – постоянная времени электромагнитных процессов;

$B_{\zeta} = 5,6$  МВт·с<sup>2</sup> – крутизна частотной характеристики.

Параметры эквивалентной нагрузки:

$P_{n,0} = 23 \cdot 10^3$  МВт – начальная мощность;

$T_n = 30$  МВт·с<sup>2</sup> – постоянная инерции движущихся частей;

$\tau_n = 5$  с – постоянная времени электромагнитных процессов;

$C_n = 11,6$  МВт·с<sup>2</sup> – крутизна частотной характеристики.

Параметры регулирующего генератора:

$P_{pmax} = 1 \cdot 10^3$  МВт – максимальная мощность;

$T_p = 25$  МВт·с<sup>2</sup> – постоянная инерции движущихся частей регулирующего генератора.

Все прочие параметры модели варьировались в соответствии с условиями экспериментов.

**Показатели качества функционирования АРЧМ.** К основным показателям качества функционирования АРЧМ отнесены следующие параметры:

максимальное отклонение частоты в переходном процессе  $\Delta f_{max}$ , Гц;

длительность переходного процесса, с;

характер переходного процесса (колебательный или аperiodичный);

отсутствие или наличие статизма после окончания переходного процесса;

динамика набора мощности регулирующего генератора, МВт/с;

отклонение мощности эквивалентного генератора от начальной в установившемся режиме  $\Delta P_{23}$ , МВт;

отклонение мощности эквивалентной нагрузки от начальной в установившемся режиме  $\Delta P_n$ , МВт.

**Виды законов регулирования.** Для определения наиболее эффективного режима работы АРЧМ проведено исследование следующих основных законов регулирования [2]: пропорционального, пропорционально-дифференциального (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД). Наиболее эффективный закон и его параметры определялись на основе анализа динамики изменения указанных величин. Причем параметры, определенные по результатам анализа одного вида закона как наиболее эффективные, принимались постоянными при исследовании следующего (что можно увидеть из табл. 1). Этими параметрами являются: максимальное отклонение частоты в переходном процессе, отклонение частоты в установившемся режиме, максимальная мощность регулирующего генератора,

мощность регулирующего генератора в установленном режиме, длительность переходного процесса и коэффициенты пропорциональности в регулирующей функции рассматриваемого закона регулирования.

Таким образом, главным результатом исследования является определение вида закона регулирования и соотношение параметров АРЧМ, при которых достигается наиболее эффективная его работа.

**Численное моделирование.** На основе эквивалентной модели ОЭС Украины была реализована процедура численного моделирования, позволяющая провести необходимые эксперименты для определения указанных параметров законов регулирования.

Система дифференциальных уравнений в рассматриваемой математической модели представима в каноническом виде задачи Коши (общая форма записи обыкновенных дифференциальных уравнений, далее ОДУ). Наиболее целесообразным для численного решения этой системы является метод Рунге-Кутты 4-го порядка [3]. Среди рассмотренных, наиболее часто используемых методов (Рунге-Кутты 2-го порядка, Рунге-Кутты-Мерсона, метод Адамса, адаптивный метод и др.) он является наиболее устойчивым, простым, достаточно точным и быстрым методом решения систем ОДУ и был выбран для численного моделирования.

Интервал времени, на котором рассматривались переходные процессы, равен 400 с. За этот интервал времени переходный процесс для любой из рассматриваемых комбинаций значений учитываемых параметров гарантированно затухает. Шаг интегрирования модели выбран 0,01 с, что также обеспечивает заданную точность результатов и достаточную скорость соответствующего алгоритма в нахождении решения. При этих параметрах время работы программы на стандартном офисном персональном компьютере при численном решении системы уравнений, включающей 5 динамических переменных, не превышает 0,5 с.

**Пропорциональный закон.** При математическом описании регулирующей функции пропорционального закона используется зависимость:

$$F_{pm} = A(\omega(t) - \omega_0), \quad (1)$$

где  $\omega(t) = 2\pi f(t)$ ;  $f$  – частота энергосистемы;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

Основной положительный эффект от использования пропорциональной составляющей в законе регулирования заключается в уменьшении значения максимального отклонения частоты  $\Delta f_{max}$  (причем  $\Delta f_{max}$  нелинейно зависит от коэффициента  $A$ ). Однако наряду с указанным положительным эффектом пропорционального закона существенным его недостатком является колебательный характер переходного процесса, который является крайне нежелательным. Функционирование регулятора, который в процессе работы за короткий период времени должен многократно изменять исходную мощность в широком диапазоне (в 6 и более раз), приведет к многократному сокращению его ресурса и значительному увеличению стоимости всей системы АРЧМ. Отклонение частоты в энергосистеме при действии пропорционального закона представлено на рис. 2.

Установлено, что  $\Delta f_{max}$  прямо пропорционально зависит от  $T_p$ , однако в диапазоне  $T_p$  от 12,5 до 50 МВт·с<sup>2</sup> (отметим, что четырехкратное изменение  $T_p$  технически намного сложнее, чем соответствующее изменение  $A$ ) не удастся избавиться от колебательного характера переходного процесса. В исследованиях принято значение  $T_p = 25$  МВт·с<sup>2</sup>, что соответствует реальным условиям организации системы АРЧМ, когда в регулировании принимает участие совокупность мощных энергоблоков.

Как видно из табл. 1, еще одним существенным недостатком этого закона является то, что для компенсации ударных возмущений по мощности с их максимальным значением  $P_{v,max}$  исходная мощность регулятора должна намного его превышать:  $P_{p,max} = \alpha_{nv} P_{v,max}$ , где коэффициент  $\alpha_{nv}$  лежит в диапазоне 1,8 ... 1,9. Эта особенность также значительно удорожает регулятор, построенный по пропорциональному закону.

Кроме того, регулятор с пропорциональным законом не в состоянии восстановить в системе номинальное значение частоты  $f_0 = 50$  Гц, поскольку ему органически присущ статизм (погрешность системы регулирования – когда по завершению переходного процесса регулируемая величина не принимает номинальное значение). Статизм обуславливается значением крутизны по частоте  $A$  (т.е. количеством энергоблоков, охваченных системой АРЧМ) и зависит от него обратно пропорционально. Его

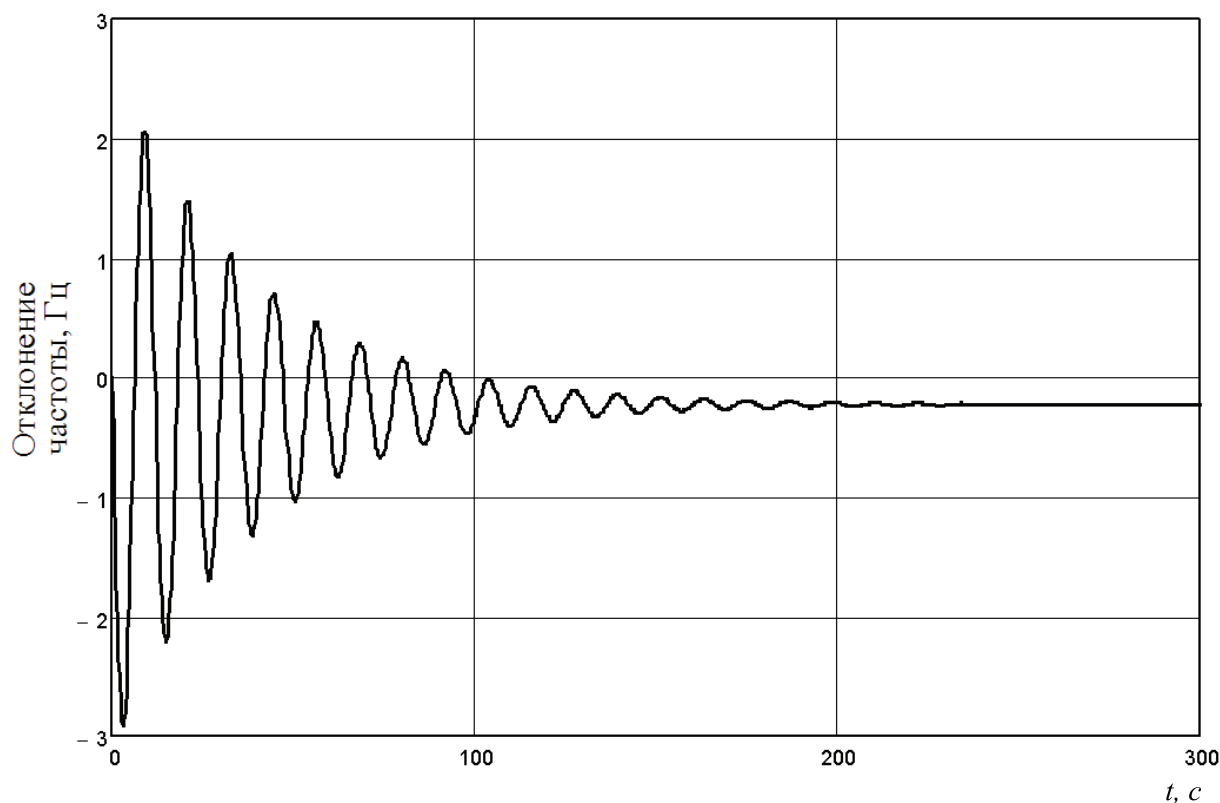


Рис. 2. Отклонение частоты в системе с пропорциональным законом

наличие является значительным недостатком пропорционального закона.

Система АРЧМ с пропорциональным законом регулирования не позволяет достигнуть апериодичного характера переходного процесса регулирования частоты и мощности ни путем вариации крутизны закона по частоте  $A$  (даже в широких диапазонах – более чем в 4 раза), ни путем вариации  $T_p$  (в 4 раза). Также существенным недостатком является весьма большая длительность процессов регулирования частоты и мощности в энергосистеме, которая существенно не удовлетворяет требованиям ENTSO-E. В рассматриваемых диапазонах изменения  $T_p$  и  $A$  длительность регулирования лежит в пределах 150 ... 300 с и больше вместо 30 с, как того требует ENTSO-E.

Таким образом, установлено, что применение пропорционального закона в системе АРЧМ с регуляторами-генераторами нецелесообразно, поскольку этот закон не в состоянии удовлетворить требованиям ENTSO-E по длительности переходных процессов, требует сложной и дорогостоящей конструкции регуляторов в системе АРЧМ, которые к тому же будут иметь существенно сокращенный ресурс работы.

**Пропорционально-дифференциальный закон.** При математическом описании регулирующей функции ПД-закона используется зависимость:

$$F_{pnd} = A(\omega(t) - \omega_0) + Q \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (2)$$

Отклонение частоты и мощность регулирующего генератора в системе с ПД-законом представлены на рис. 3.

Дифференциальная составляющая ПД-закона регулирования позволяет исключить колебательный характер и, действуя вместе с пропорциональной составляющей, дополнительно снижает максимальное отклонение частоты энергетической системы и продолжительность переходного процесса (рис. 3 а). Вариация коэффициента  $Q$  ПД-закона в диапазоне от 0 до 2500 МВт·с<sup>2</sup> и выше показывает, что с его возрастанием улучшаются все упомянутые и прочие динамические характеристики системы АРЧМ, в том числе – уменьшается максимальное значение мощности регулятора (рис. 3 б).

Апериодический характер переходного процесса достигается путем вариации коэффициента  $Q$ . При значениях  $Q < 1000$  МВт·с<sup>2</sup> имеет

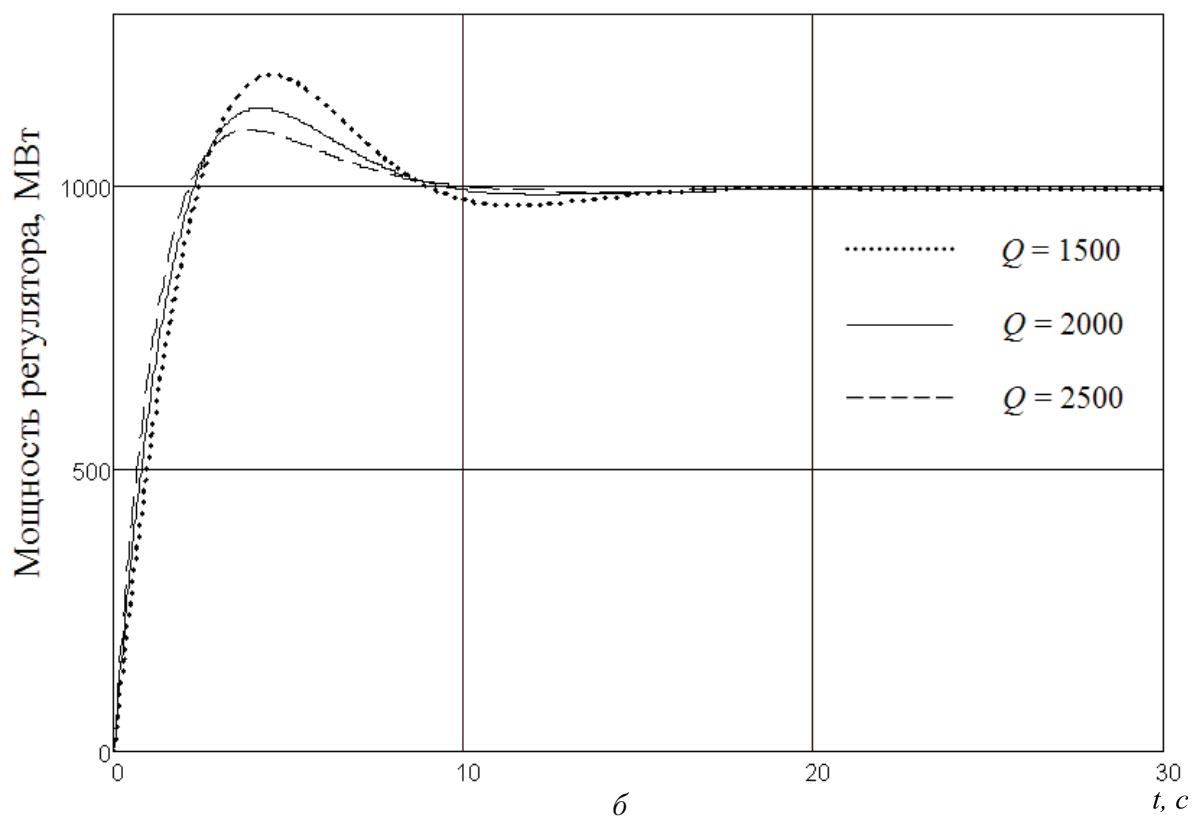
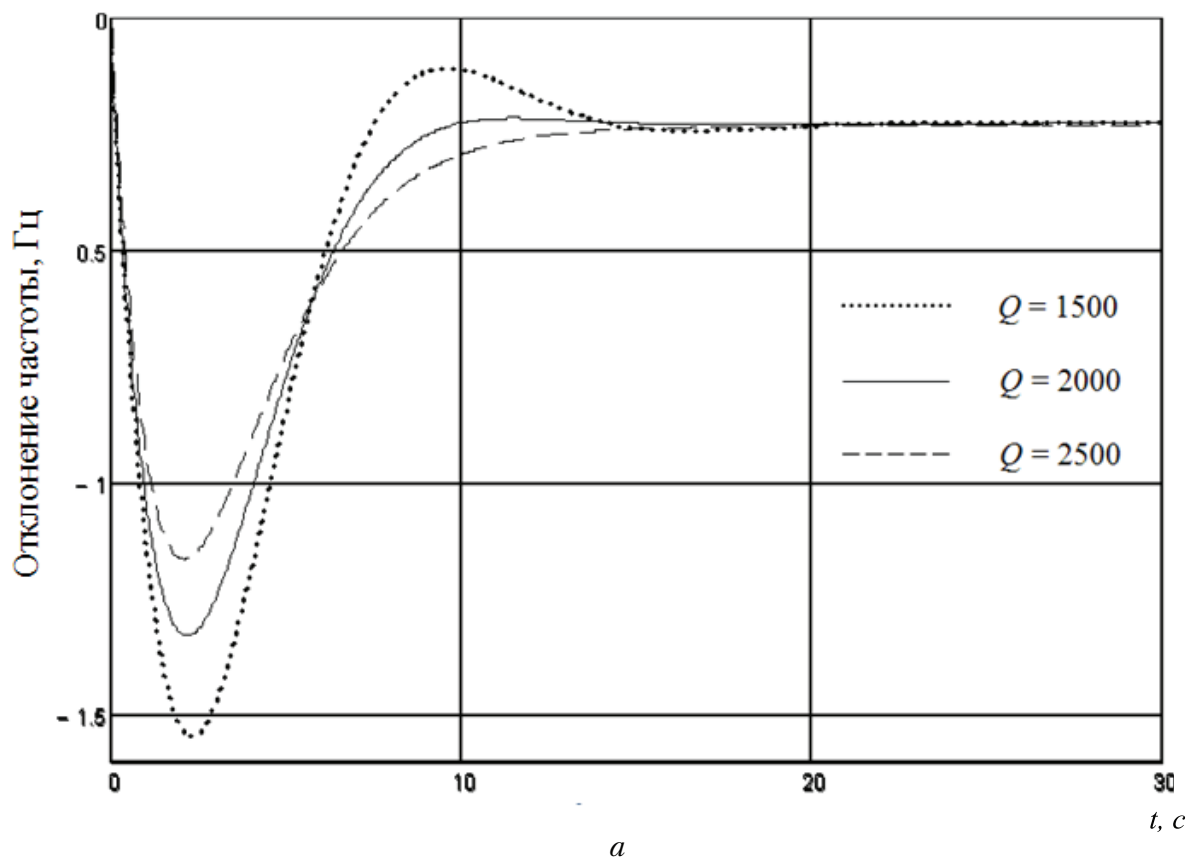


Рис. 3. Отклонение частоты (а) и мощность регулирующего генератора (б) в системе с пропорционально-дифференциальным законом регулирования

место колебательный характер переходных процессов. Однако, начиная со значений 1000 ... 1200 МВт·с<sup>2</sup>, динамика изменения частоты системы приобретает устойчиво апериодичный характер. При этом переходные процессы затухают спустя 25 ... 30 с от начала переходного процесса. Из рис. 3 а видно, что с увеличением коэффициента  $Q$  колебательный характер переходного процесса устраняется, и значение отклонения частоты асимптотически приближается к статическому значению  $\Delta f_{cm} = -0,226$  Гц. Максимальное отклонение частоты при  $Q = 1500$  составляет  $-1,5$  Гц, при  $Q = 2000$  показатель  $\Delta f_{max} = -1,329$  Гц и при  $Q = 2500$  отклонение  $\Delta f_{max} = -1,1$  Гц (тогда как в пропорциональном законе, т.е. при  $Q = 0$  и прочих равных,  $\Delta f_{max} = -2,906$  Гц). При этих же показателях ПД-закона максимальное значение мощности регулятора соответственно составляет  $P_{pzmax}$  ( $Q = 1500$ )  $\cong 1230$  МВт,  $P_{pzmax}$  ( $Q = 2000$ ) = 1135 МВт и  $P_{pzmax}$  ( $Q = 2500$ )  $\cong 1110$  МВт.

Таким образом, включение в пропорциональный закон производной от частоты кардинальным образом улучшает характер переходных процессов с точки зрения показателей качества функционирования системы АРЧМ.

Однако ПД-закону, как и пропорциональному, присущ статизм, что является существенным недостатком. Вследствие статизма после завершения переходных процессов в энергосистеме устанавливаются режимы с одной и той же величиной  $\Delta f_{cm} = -0,226$  Гц, не зависящей от значения  $Q$ .

В рассматриваемой модели величину статизма в системах с пропорциональным законом и ПД-законом принципиально невозможно уменьшить до нуля без угрозы потери устойчивости энергосистемы. Наличие этого недостатка ограничивает возможности использования ПД-закона при синтезе систем АРЧМ, построенных на базе регулирующих генераторов.

**Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон.** В теории автоматического регулирования основная задача интегральной составляющей закона регулирования заключается в устранении статизма. Недостатки, присущие как пропорциональному, так и пропорционально-дифференциальному законам регулирования в системах АРЧМ с регулирующими генераторами, приводят к необходимости исследовать возможности таких систем, когда в

их законах регулирования используется (кроме указанных) интегральная составляющая (с целью устранения статизма).

При математическом описании регулирующей функции ПИД-закона используется зависимость:

$$F_{pid} = A(\omega(t) - \omega_0) + Q \frac{d\omega(t)}{dt} + S \int_{t_0}^T (\omega(t) - \omega_0) dt. \quad (3)$$

Следует отметить, что в случае использования пропорционального и пропорционально-дифференциального законов при условии  $\omega(t) = \omega_0$  величины  $F_{pzn}$  и  $F_{pid}$  [зависимости (1) и (2)] в установившемся режиме тождественно равняются нулю. Эта особенность обуславливает обязательное наличие статизма в системах АРЧМ с пропорциональным или ПД-законом.

При исследованиях ПИД-закона велась вариация коэффициента  $S$  в интервале от 10 до 40 МВт. Сопоставление характеристик соответствующих процессов демонстрирует, прежде всего, достижение поставленной цели, а именно, отсутствие статизма в установившихся режимах. Отклонение частоты в системе с ПИД-законом представлено на рис. 4.

Показатели отклонения частоты и мощности генератора-регулятора в начальный период ( $t \leq 20$  с) мало отличаются от тех же показателей при использовании ПД-закона (что для  $\Delta f(t)$  и  $\Delta f_{max}$  видно из сравнения рис. 4 с кривой для  $Q = 2000$  на рис. 3 а), т.е. в целом они удовлетворяют соответствующим требованиям.

Однако ПИД-закону присущ другой существенный недостаток: значительно (в разы) увеличивается длительность переходного процесса. Если для ПД-закона эта длительность находится в пределах 25 ... 30 с, то для ПИД-закона этот показатель составляет 60 ... 80 с и больше (рис. 4), что является недопустимым согласно требованиям ENTSO-E.

Проведенные исследования показали, что сокращение длительности переходного процесса возможно путем уменьшения постоянной инерции регулирующего генератора  $T_p$ . При  $T_p = 15$  МВт·с<sup>2</sup> и коэффициенте  $S = 40$  МВт длительность переходного процесса составляет 20 с.

**Сравнение характеристик законов регулирования.** В таблице приведены сравнительные характеристики системы АРЧМ в зависимости от параметров законов регулирования при

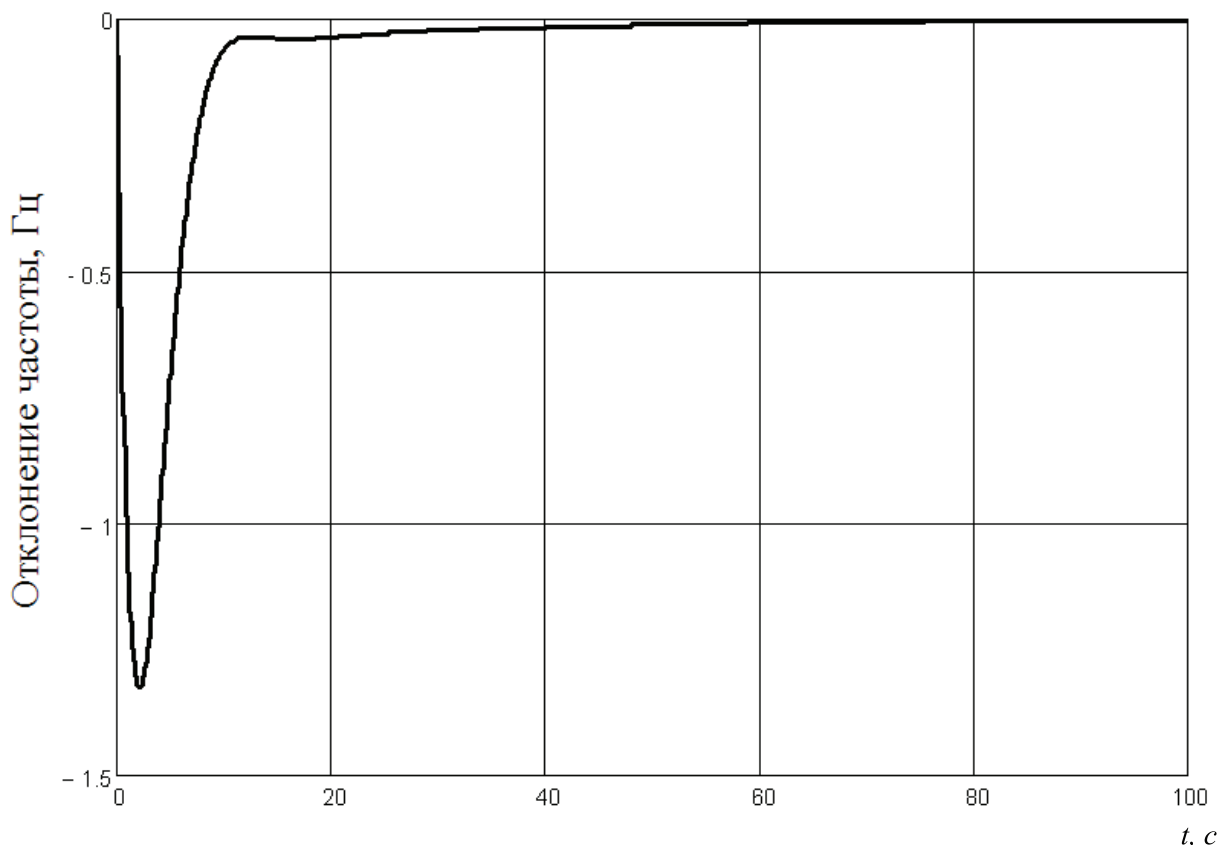


Рис. 4. Отклонение частоты в системе с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом

постоянной инерции регулирующего генератора  $T_p = 25 \text{ МВт}\cdot\text{с}^2$ .

Как видно из таблицы, при использовании пропорционального закона с увеличением коэффициента  $A$  уменьшаются максимальное отклонение частоты (по модулю) и отклонение

частоты в установившемся режиме, в нем же возрастает мощность регулятора. Причем эта мощность не превышает максимального значения (1000 МВт), что также является следствием статизма. С увеличением коэффициента  $A$  увеличивается длительность переходного процесса.

Таблица

Закон	Характер переходного процесса, наличие статизма	Параметры закона регулирования			Отклонение частоты, Гц		Мощность регулятора, МВт		Длительность переходного процесса, с
		$A$	$Q$	$S$	Макс.	Установившийся режим	Макс.	Установившийся режим	
Пропорциональный	Колебательный, со статизмом	350	0	0	-4,046	-0,447	1698	983	210
		700	0	0	-2,906	-0,225	1801	992	280
		1500	0	0	-2,001	-0,105	1876	997	300
ПД	Апериодический, со статизмом	700	1500	0	-1,549	-0,225	1194	992	25
		700	2000	0	-1,330	-0,225	1135	992	25
		700	2500	0	-1,162	-0,225	1097	992	25
ПИД	Апериодический, астатический	700	2000	10	-1,320	0	1142	1000	240
		700	2000	20	-1,320	0	1150	1000	100
		700	2000	40	-1,320	0	1166	1000	90

При использовании ПД-закона вариация коэффициента  $Q$  (при одном и том же коэффициенте  $A$ ) не влияет на характеристики установившегося режима (мощность регулятора и отклонение частоты остаются неизменными), в том числе при  $Q = 0$  (т.е. при пропорциональном законе). С увеличением коэффициента  $Q$  уменьшаются максимальные значения отклонения частоты и мощности регулятора. Также вариация  $Q$  (в рассмотренном диапазоне) не влияет на длительность переходного процесса в системе с ПД-законом, которая является минимальной среди рассмотренных законов.

Увеличение коэффициента  $S$  в ПИД-закоме приводит к уменьшению максимальной мощности регулятора и сокращению длительности переходного процесса.

## ВЫВОДЫ

1. Применение пропорционального закона регулирования является нецелесообразным, прежде всего, ввиду большой длительности переходных процессов и их колебательного характера, что приводит к существенному удорожанию регуляторов в системе АРЧМ.

2. При значительном уменьшении длительности переходного процесса при действии ПД-закона главным его недостатком является наличие статизма, что крайне усложняет его применение при синтезе систем АРЧМ.

3. ПИД-закон удовлетворяет требованиям ENTSO-E по показателям отклонения частоты и мощности регулирующего генератора (в отличие от пропорционального и ПД-законов), однако для его реализации необходимы регулирующие генераторы с меньшей постоянной инерции, что приводит к удорожанию системы АРЧМ.

1. Кулик М.М., Дрёмин И.В. Основи організації автоматичної системи регулювання частоти і потужності на базі споживачів-регуляторів // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – Вип. 1 (21). – С. 5–10.
2. Воронов А.А. Теория автоматического управления. – М.: Высш. шк., 1986. – 31 с.
3. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 450 с.

*Надійшла до редколегії: 16.02.2011*