

# СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА КОМПЛЕКСНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИКИ

УДК 621.316.726

**И.В. ДРЁМИН**

Институт общей энергетики НАН Украины, г. Киев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ АРЧМ С ПОТРЕБИТЕЛЯМИ-РЕГУЛЯТОРАМИ

*Исследованы законы регулирования на основе математической модели автоматической системы регулирования частоты и мощности (АРЧМ) с потребителями-регуляторами в составе Объединенной энергосистемы Украины. Выявлены параметры основных законов регулирования, определен наиболее эффективный из них, а также проведено сопоставление с аналогичными исследованиями для АРЧМ с регулирующими генераторами.*

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

Практически во всех энергосистемах мира при построении автоматических систем регулирования частоты и мощности (АРЧМ) используется традиционный подход, когда при появлении в Объединенной энергосистеме (ОЭС) по тем или иным причинам дефицита мощности в действие вводятся дополнительные (регулирующие) мощности. Наряду с этим Украина имеет возможность построить АРЧМ на базе потребителей-регуляторов – их режимы работы предусматривают не только возможность ограничения электропотребления в часы максимума с целью выравнивания нагрузки электроснабжения [1], но и позволяют участвовать в процессах вторичного регулирования (в системе АРЧМ). Это обусловлено, прежде всего, становлением технологий с необходимыми по мощности и быстродействию параметрами (гидродинамические генераторы “Термер”, теплонасосные станции [2]).

Ужесточение требований к качеству электроэнергии и объединение европейских энергосистем являются одними из основных характерных тенденций развития современной электроэнергетики. Как показывают исследования [3], присоединение энергосистем стран СНГ, в том числе и ОЭС Украины, к Европейской сети системных операторов передачи электроэнергии (ENTSO-E) технически и экономически

возможно. Кроме того, Россия, энергосистема которой на данный момент фактически выполняет функцию АРЧМ для ОЭС Украины, также ведет разработки, направленные на присоединение к ENTSO-E [4].

Основным препятствием перед внедрением в Украине полноценной традиционной АРЧМ, отвечающей требованиям ENTSO-E, является сложность и высокая стоимость регулирующих генераторов. С другой стороны, в литературе отсутствуют результаты исследований полных математических моделей, описывающих АРЧМ с потребителями-регуляторами. Рассмотрение такой модели, представленной в [2], позволит определить наиболее эффективный закон регулирования путем анализа соответствующих показателей качества функционирования системы АРЧМ, тогда как натурные эксперименты в ОЭС требуют существенных затрат и длительного времени.

В данной работе необходимые эксперименты аналогично [5] проведены путем численного моделирования соответствующей математической модели. Кроме того, проведено сопоставление результатов данного исследования с исследованием модели традиционной АРЧМ (с регулирующими генераторами [5]), что позволило определить преимущества АРЧМ в зависимости от вида регулирующего элемента в системе.

**Эквивалентная модель ОЭС Украины.** Как и в статье [5], в данной работе исследуются

© И.В. ДРЁМИН, 2011

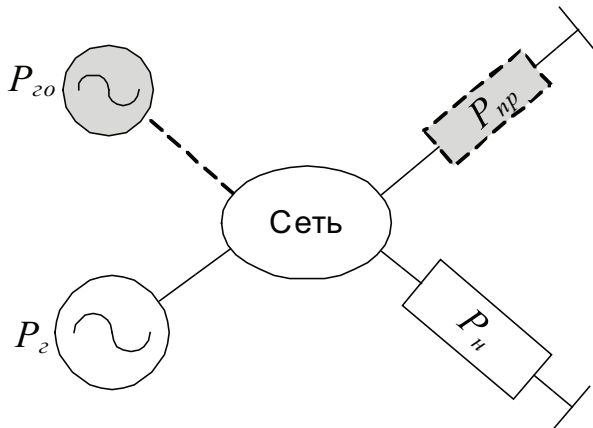


Рис. 1. Схема автоматического регулирования частоты и мощности

переходные процессы в ОЭС Украины, вызванные аварийным отключением энергоблока максимальной единичной мощности 1000 МВт. Однако, в отличие от работы [5], регулируемыми элементами в системе АРЧМ являются потребители-регуляторы.

Исследуемая модель построена по аналогии с [2] с помощью эквивалентирования более общей модели ОЭС Украины [4] и представлена на рис. 1.

**Начальные условия.** В качестве исходных, условно-постоянных параметров модели приняты значения, приведенные ниже.

Общесистемные параметры:

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

$P_{z0} = 1000$  МВт – мощность аварийно отключающегося генератора (образование дефицита электрической мощности, происходящее в нулевой момент времени);

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

Параметры эквивалентного генератора:

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

$T_z = 50$  МВт·с<sup>2</sup> – эквивалентная постоянная инерции движущихся частей оборудования, связанного с ротором;

$\tau_z = 10$  с – постоянная времени электромагнитных процессов;

$B_z = 5,6$  МВт·с<sup>2</sup> – крутизна частотной характеристики.

Параметры эквивалентной нагрузки:

$P_{n,0} = 24 \cdot 10^3$  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 потребителя-регулятора:

$P_{np0} = 1 \cdot 10^3$  МВт – начальная мощность;

$T_{np} = 1$  МВт·с<sup>2</sup> – постоянная инерции движущихся частей.

Все прочие параметры модели варьировались в соответствии с условиями экспериментов.

**Виды законов регулирования.** В работе проведено исследование следующих основных законов регулирования: пропорционального, пропорционально-дифференциального (ПД), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД). Наиболее эффективный закон и его параметры определялись на основе анализа следующих величин (представляющих собой принятые показатели качества функционирования АРЧМ):

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

длительность переходного процесса, с;

характер переходного процесса (колебательный или аperiodический);

отсутствие или наличие статизма после окончания переходного процесса.

При этом параметры, определенные по результатам анализа одного вида закона как наиболее эффективные, принимались постоянными при исследовании следующего. Кроме того, параметры исследуемых законов варьировались с учетом возможности дальнейшего сопоставления с традиционной АРЧМ. Таким образом, помимо определения наиболее эффективного закона регулирования для потребителей-регуляторов, важным результатом исследования является сопоставление с аналогичными исследованиями, приведенными в работе [5].

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

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

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

Наряду с основным положительным эффектом пропорционального закона, а именно уменьшением значения максимального отклонения частоты  $\Delta f_{max}$ , существенным его недостатком является крайне нежелательный колебательный характер переходного процесса.

Функционирование регулятора (даже если это потребитель-регулятор), который в процессе работы за короткий период времени должен многократно изменять свою мощность в широком диапазоне, приведет к сокращению в разы его ресурса и увеличению стоимости всей системы АРЧМ. Отклонение частоты в энергосистеме  $\Delta f$  при действии пропорционального закона для различных параметров системы АРЧМ проиллюстрировано на рис. 2.

При исследовании пропорционального закона велась вариация коэффициента пропорциональности  $A$  в диапазоне 350...1500 и постоянной инерции потребителя-регулятора  $T_{np}$  в диапазоне 1...10. Установлено, что увеличение коэффициента  $A$  приводит к уменьшению  $\Delta f_{max}$ , однако практически не влияет на продолжительность переходного процесса. В то же время с уменьшением  $T_{np}$  уменьшается как  $\Delta f_{max}$ , так и длительность переходного процесса, что также видно из рис. 2. Причем влияние этих параметров в рассматриваемых диапазонах на длительность процесса и  $\Delta f_{max}$  носит монотонный характер и не позволяет избавиться от колебательного характера процесса регулирования.

Несмотря на относительно быстрое затухание переходного процесса (меньше 30 с для  $T_{np} = 1$  с), пропорциональный закон не удовлетворяет требованиям ENTSO-E ввиду того, что отклонение частоты превышает граничное значение для послеаварийных режимов ( $50 \pm 0,18$  Гц).

Следует отметить отсутствие статизма в этом законе (при равенстве аварийно отключаемой генерирующей мощности и начальной

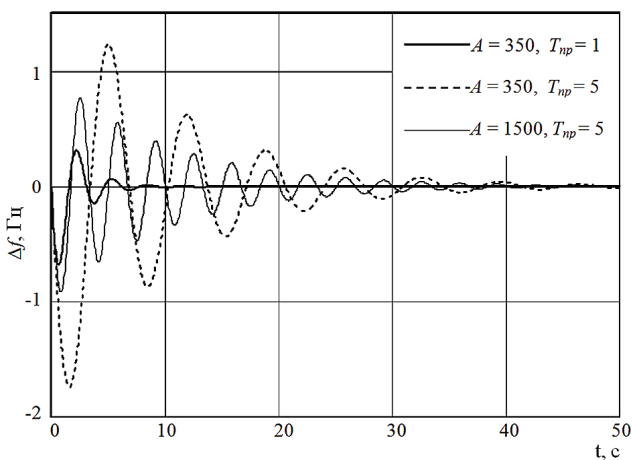


Рис. 2. Отклонение частоты в системе с пропорциональным законом

мощности потребителя-регулятора), что является отличием от результатов аналогичных исследований для традиционной АРЧМ. Это обусловлено тем, что с уменьшением отклонения частоты уменьшается регулирующий параметр, то есть мощность потребителя-регулятора  $P_{np}$ , и при  $\Delta f = 0$  мощность регулятора  $P_{np} = 0$ .

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

$$F_{pnd} = -A(\omega(t) - \omega_0) - Q \frac{d\omega(t)}{dt}. \quad (4)$$

Отклонение частоты и мощность потребителя-регулятора в системе с ПД-законом представлены на рис. 3 и 4 соответственно.

Главным назначением дифференциальной составляющей ПД-закона является исключение колебательного характера переходного процесса. Вариация коэффициента  $Q$  ПД-закона в диапазоне от 0 до 2500 МВт·с<sup>2</sup> и выше показывает, что колебательный характер процесса устраняется уже при значениях  $Q \geq 200$  МВт·с<sup>2</sup>, при этом частота асимптотически приближается к астатическому значению 50 Гц. Кроме того, дифференциальная составляющая существенно сокращает длительность переходного процесса, что вытекает из сравнения рис. 3 и 2, а максимальное отклонение частоты  $\Delta f_{max}$  с увеличением  $Q$  монотонно уменьшается.

Как видно из рис. 3, ПД-закон существенно улучшает характеристики переходного процесса, особенно по сравнению с аналогичными характеристиками для традиционной АРЧМ.

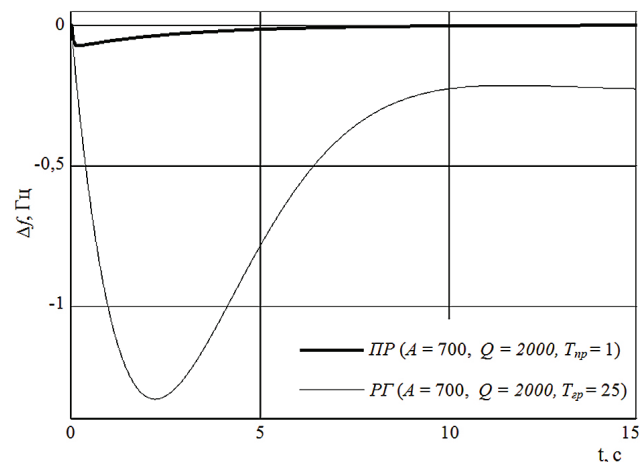


Рис. 3. Отклонение частоты в системе с ПД-законом для потребителя-регулятора (ПР) и регулирующего генератора (РГ)

При этом максимально допустимое отклонение частоты  $\Delta f = 0,18$  Гц, регламентированное требованиями ENTSO-E, вообще не наблюдается на протяжении всего интервала регулирования (на рис. 3  $\Delta f_{max} = -0,073$ ). При этом предел отклонения частоты для нормального режима ОЭС  $50 \pm 0,02$  Гц достигается за 10-секундный период с момента возникновения возмущения в энергосистеме. Таким образом, ПД-закон действует гораздо более эффективно, чем пропорциональный, и обеспечивает соответствие всем требованиям ENTSO-E.

Обращает на себя внимание то, что в определенные моменты времени математическая модель при расчетах АРЧМ с потребителями-регуляторами переводит их в режим генерации, что показано на рис. 4. Этот эффект устраняется путем наложения ограничения на мощность потребителя-регулятора ( $P_{np} \geq 0$ ) в алгоритме поиска численного решения соответствующей системы дифференциальных уравнений. Эксперименты, проведенные с учетом этого ограничения, показали, что оно не оказывает существенного влияния на характеристики процесса регулирования при данных параметрах системы АРЧМ. Результаты исследований, учитывающих это, а также другие ограничения на элементы системы АРЧМ планируется представить в дальнейших публикациях.

**Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон.** Основным назначением интегральной составляющей закона регулирования является устранение статизма [6]. Кроме того, интегральная составляющая включается в

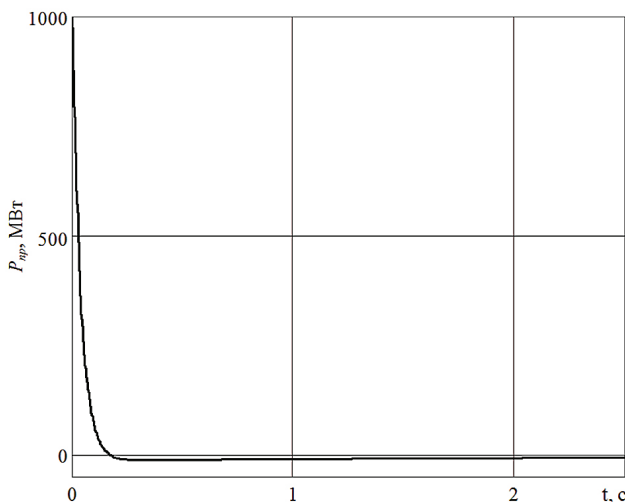


Рис. 4. Мощность потребителя-регулятора в системе с ПД-законом

законы регулирования для повышения устойчивости энергосистемы [6], в том числе для уменьшения системных качаний [4. Приложение V].

При математическом описании регулирующей функции ПИД-закона используется зависимость

$$F_{прмид} = -A(\omega(t) - \omega_0) - Q \frac{d\omega(t)}{dt} - S \int_{t_0}^T (\omega(t) - \omega_0) dt. \quad (5)$$

При исследованиях ПИД-закона также велась вариация коэффициента  $S$  в интервале от 0 до 40 МВт. Как видно из рис. 5, увеличение  $S$  приводит не только к утрате апериодического характера изменения частоты, но и, как следствие, к увеличению длительности переходного процесса.

**Сопоставление законов регулирования и сравнение с традиционной АРЧМ.** Поскольку параметры исследуемой модели ОЭС повторяют параметры модели для ОЭС с регулирующими генераторами (за исключением параметров регуляторов и законов регулирования [5]), возможно корректное сопоставление результатов исследований этих моделей, приведенное в таблице. Кроме того, с целью сопоставления законов регулирования для различных типов АРЧМ их параметры также приняты равными, поскольку для АРЧМ с потребителями-регуляторами они остаются близкими к наиболее эффективным, что не противоречит условиям определения наиболее эффективного закона регулирования.

Как видно из таблицы, при использовании пропорционального закона с увеличением коэффициента  $A$  уменьшается максимальное

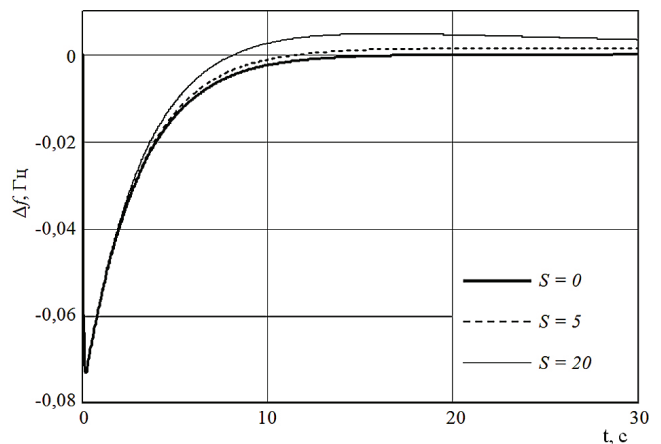


Рис. 5. Отклонение частоты в системе с ПИД-законом

Таблица

Закон	Характер переходного процесса	Параметры закона регулирования			Отклонение частоты, Гц				Длительность переходного процесса, с	
		A	Q	S	Максимальное		В установившемся режиме			
					ПР*	РГ**	ПР	РГ	ПР	РГ
Пропорциональный	Колебательный	350	0	0	-0,679	-4,046	0	-0,447	14	210
		700	0	0	-0,524	-2,906	0	-0,225	14	280
		1500	0	0	-0,385	-2,001	0	-0,105	14	300
ПД	Апериодический	700	1500	0	-0,094	-1,549	0	-0,225	18	25
		700	2000	0	-0,073	-1,330	0	-0,225	16	25
		700	2500	0	-0,060	-1,162	0	-0,225	19	25
ПИД	Апериодический	700	2000	10	-0,073	-1,320	0	0	140	240
		700	2000	20	-0,073	-1,320	0	0	100	100
		700	2000	40	-0,073	-1,320	0	0	60	90

\* ПР – АРЧМ с потребителем-регулятором; \*\* РГ – АРЧМ с регулирующим генератором.

отклонение частоты (по модулю) для обоих типов АРЧМ, тогда как отклонение частоты в установившемся режиме для АРЧМ с потребителем-регулятором в рассмотренных случаях равняется нулю при применении любого из рассматриваемых законов в отличие от АРЧМ с регулирующим генератором. Длительность переходного процесса для потребителя-регулятора от коэффициента  $A$  не зависит.

При использовании ПД-закона вариация коэффициента  $Q$  при одном и том же коэффициенте  $A$  не влияет на характеристики установившегося режима, в том числе при  $Q = 0$ , т.е. при пропорциональном законе. Также вариация  $Q$  в рассматриваемом диапазоне слабо влияет на длительность переходного процесса в системе с ПД-законом для потребителя-регулятора и не влияет на длительность для регулирующего генератора. Несмотря на увеличение длительности переходного процесса с увеличением  $Q$ , оно является незначительным, и система с запасом удовлетворяет требованиям ENTSO-E для любых  $Q$  в рассматриваемом диапазоне в отличие от АРЧМ с регулирующим генератором, что также видно из рис. 3.

Увеличение коэффициента  $S$  в ПИД-законе приводит к увеличению длительности переходного процесса, тогда как аналогичное его увеличение в АРЧМ с регулирующим генератором эту длительность сокращает. Таким образом, ПИД-закон является менее эффективным по

сравнению с ПД-законом, несмотря на несовершенство последнего для АРЧМ с регулирующим генератором.

Технологические особенности потребителей-регуляторов позволяют им участвовать в регулировании частоты без существенных затрат на соответствующую модернизацию, что наряду с их высокой эффективностью в качестве регуляторов приводит к существенному удешевлению системы АРЧМ.

## ВЫВОДЫ

Применение пропорционального закона регулирования является нецелесообразным, прежде всего, ввиду существенной длительности и колебательного характера переходных процессов. Этот закон не удовлетворяет также требованию ENTSO-E к граничному отклонению частоты в послеаварийных режимах.

ПД-закон полностью удовлетворяет требованиям ENTSO-E, обладает наилучшими характеристиками по всем показателям качества регулирования и является наиболее эффективным из рассмотренных законов.

Использование ПИД-закона в АРЧМ с потребителями-регуляторами не дает дополнительных преимуществ по показателям качества регулирования и увеличивает длительность переходного процесса. Однако его применение может оказаться целесообразным для обеспечения устойчивости системы.

АРЧМ с потребителями-регуляторами имеет существенное преимущество перед системами аналогичного назначения, построенными на традиционных подходах, не только с технологической, но и с экономической точек зрения.

1. *Системи електропостачальні загального призначення*. Терміни та визначення: ДСТУ 3465-96. – К.: Держстандарт України, 1996. – 19 с. – (Національний стандарт України).
2. Кулик М.М., Дрёмін І.В. Основи організації автоматичної системи регулювання частоти і потужності на базі споживачів-регуляторів // Проблеми загальної енергетики. – 2010. – Вип. 1 (21). – С. 5–10.
3. *Feasibility Study: Synchronous Interconnection of the IPS/UPS with the UCTE*. Union for the Coordination of Transmission of Electricity, Brussels – Belgium, 2008. – 16 p.
4. *Проблемы совершенствования* регулирования частоты в ЕЭС России в условиях конкурентного рынка и программные задачи по подготовке к синхронной работе энергообъединений Востока и Запада. – М.: СПО ОРГРЕС, 2002. – 319 с.
5. Дрёмін І.В. Исследование режимов работы автоматической системы регулирования частоты и мощности с регулирующими генераторами // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 1 (24). – С. 11–18.
6. *Основные технические* требования к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии. Правила и рекомендации по регулированию частоты и перетоков / Утверждено решением Электроэнергетического Совета СНГ. Протокол № 32 от 12 октября 2007 г. [Электронный ресурс]. – www.so-ups.ru. – 22 с.

*Надійшла до редколегії: 07.04.2011*