

## УЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ С АРЧМ

*Разработан способ учета нелинейных технологических ограничений при моделировании систем автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ) посредством решения соответствующей системы дифференциальных уравнений специализированным численным методом. Определены характер и степень влияния нелинейных ограничений на переходные процессы, возникающие в энергосистеме с АРЧМ в результате ударного возмущения – возникновения дефицита мощности.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* энергосистема, автоматическая система, регулирование частоты, потребитель-регулятор, генератор-регулятор, технологические ограничения.

Важнейшей характеристикой управляемости электроэнергетической системы является требуемая точность поддержания частоты. По мере продолжающейся тенденции укрупнения электроэнергетических систем требования к управляемости и, следовательно, к системе автоматического регулирования частоты и мощности непрерывно возрастают. Это обуславливает необходимость как экстенсивного развития системы АРЧМ за счет увеличения резервов регулирования, так и интенсивного развития путем повышения эффективности процесса регулирования.

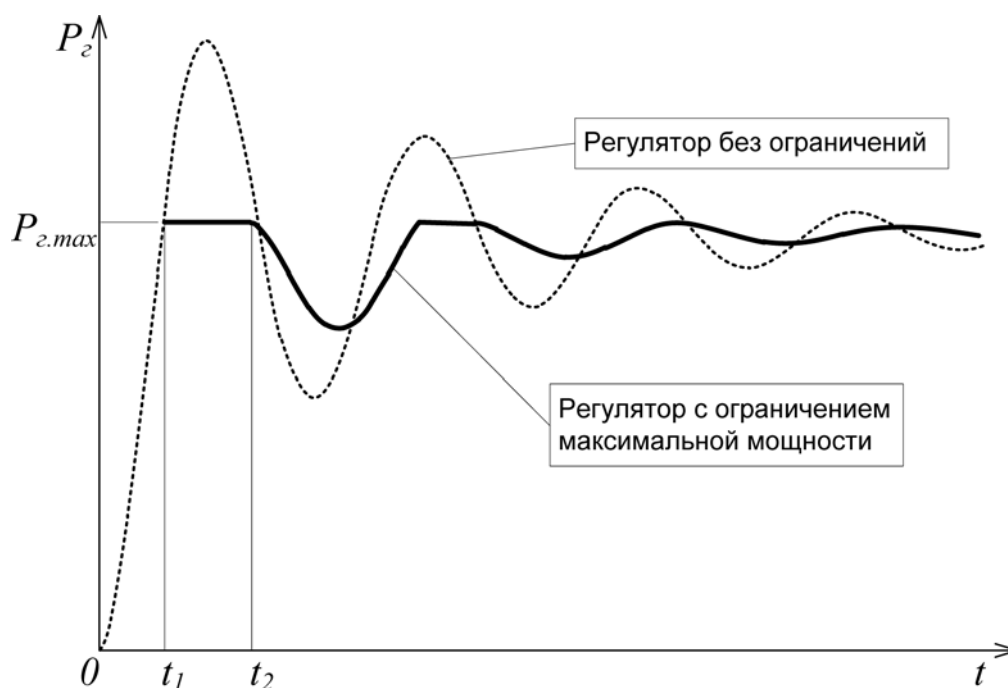
Наиболее общим подходом к моделированию динамических систем является использование системы дифференциальных уравнений [1], на основе которой исследуется возможность повышения эффективности АРЧМ. Такая система уравнений моделирует электро-механические переходные процессы, возникающие в энергосистеме, в том числе в результате ударного возмущения. Она состоит из уравнения баланса мощности, которое отражает динамику изменения частоты, и из четырех групп уравнений, описывающих динамику изменения мощности, соответственно, для генераторов, нагрузки, генераторов-регуляторов (ГР) и потребителей-регуляторов (ПР).

Для регуляторов введены обобщенные функции регулирования, которые реализуют один из основных законов регулирования: пропорциональный, пропорционально-дифференциальный (ПД) или пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД).

На этапах первичного и вторичного регулирования частоты приобретают существенную значимость технологические ограничения, которые с точки зрения систем дифференциальных уравнений являются нелинейными. Наиболее значимые из них – ограничение на скорость изменения мощности регулятора, на уровень его мощности и зону нечувствительности к отклонению частоты.

При этом моделирование АРЧМ с учетом этих ограничений практически осуществимо только лишь в комбинации с соответствующими численными методами решения разработанной модели. Таким образом, способ учета нелинейных технологических ограничений заключается в решении системы линейных дифференциальных уравнений с нелинейными ограничениями модифицированным численным методом, посредством которого эти ограничения учитываются.

**Ограничения на уровень мощности регулятора.** Для адекватного представления регулирующей мощности  $P_{рег}$  в математической модели и ее действия в ходе соответствующего



**Рис. 1.** Влияние ограничения мощности регулятора на переходный процесс

переходного процесса, она должна удовлетворять следующему двустороннему ограничению:

$$0 \leq P_{рег} \leq P_{рег\ max}, \quad (1)$$

где  $P_{рег\ max}$  – максимально допустимая мощность регулятора, определяемая технологическими особенностями.

На рис. 1 представлены результаты расчета, характерные для переходного процесса (изменение мощности регулятора) в энергосистеме без учета и с учетом ограничений (1). Рассматриваемый переходный процесс возникает в результате ударного возмущения (возникновение дефицита мощности) в энергосистеме с регулятором-генератором, действующим по пропорциональному закону.

Из рисунка видно, что до момента времени  $t_1$  процессы изменения мощности регулятора с ограничением и без него совпадают. В период времени с  $t_1$  по  $t_2$  регулятор вырабатывает постоянную мощность, а затем начинается ее снижение, но по другой кривой. Это обусловлено тем, что само по себе это ограничение является возмущением, т. е. оно дополнительно изменяет частоту всей энергосистемы в переходном процессе.

Следовательно, ограничение (1) оказывает сильное влияние на результат расчета модели для каждого из элементов энергосистемы.

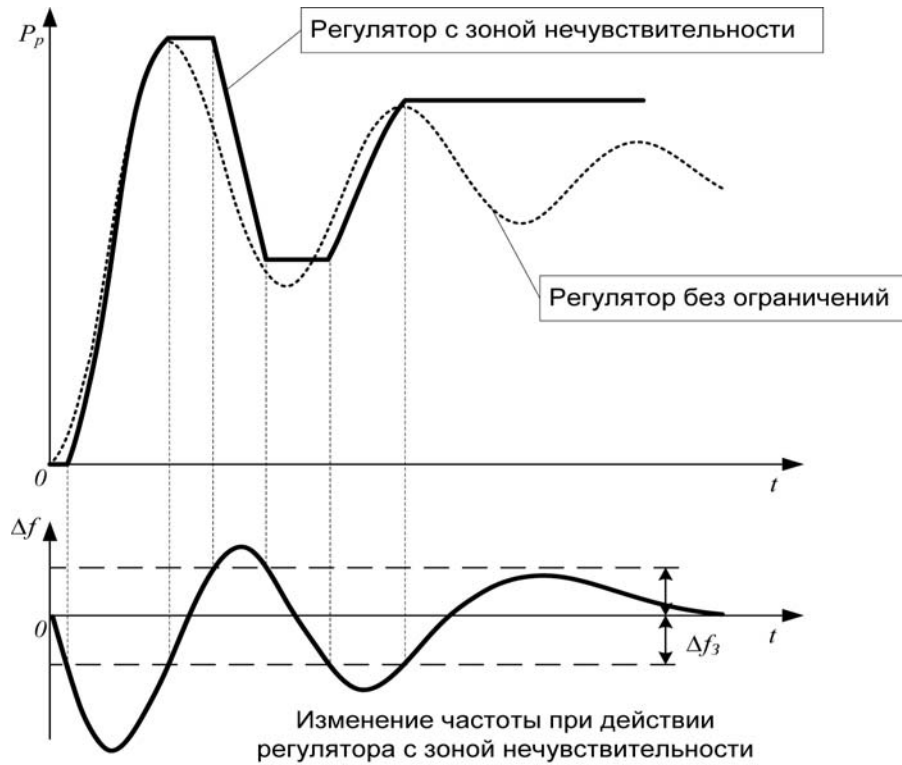
Причем это справедливо и для ГР, и для ПР. Кроме того, введение этого ограничения позволит уменьшить необходимый резерв регулирующих мощностей (вне зависимости от типа регуляторов) путем определения наиболее эффективной конфигурации прочих параметров математической модели и параметров законов регулирования.

**Зона нечувствительности.** В соответствии с требованиями ENTSO-E [4] зона нечувствительности регуляторов к отклонению частоты должна быть как можно меньшей и не превышать  $\Delta f_3 = 20$  мГц. Иными словами, эти регуляторы срабатывают при возникновении ситуации в энергосистеме, когда:

$$|\Delta f| \geq \Delta f_3, \quad (2)$$

На рис. 2 представлены графики мощности регулятора и соответствующее изменение частоты в ходе колебательного переходного процесса при возникновении дефицита мощности.

В реальных регуляторах организация их работы с учетом зоны нечувствительности снизит износ оборудования. Так, из рис. 2 видно, что режим работы регулятора с зоной нечувствительности существенно облегчается, и, естественно, при возврате частоты в рамки зоны нечувствительности (которая в общем случае соответствует требованиям к качеству регулирования) регулятор прекращает процесс



**Рис. 2.** Влияние зоны нечувствительности на работу регулятора (где  $\Delta f_3$  – зона нечувствительности)

регулирования и выходит на постоянный режим работы.

**Скорость набора/сброса мощности.** Для различных стадий регулирования частоты и мощности в энергосистеме используются разные регуляторы. При первичном регулировании используются, как правило, регуляторы скорости турбин. При ударных (больших) возмущениях в работу вступают регуляторы вторичного регулирования, а именно, регуляторы мощности котлов на ТЭС и гидроагрегатов на ГЭС, выделенных для участия во вторичном регулировании. Основной характеристикой вторичных регуляторов является их быстродействие.

Дифференциальные уравнения, описывающие динамику работы регуляторов, учитывают быстродействие регуляторов только с точки зрения инерционности механических и электромагнитных процессов в них [1]. Однако, помимо инерционности, наиболее значимыми характеристиками маневренных возможностей регулятора являются скорости сброса и набора мощности в процессе регулирования [4].

Обозначим ограничение на скорость набора мощности –  $L_n$ , сброса –  $L_c$ . Иными словами, для  $s$ -го ГР:

$$L_{cgzps} \leq \frac{dP_{zps}(t)}{dt} \leq L_{ngzps}, t = [t_0, t_1], P_{zps} = [P_{zpsg1}, P_{zpsg2}] \quad (3)$$

Для  $k$ -го ПР:

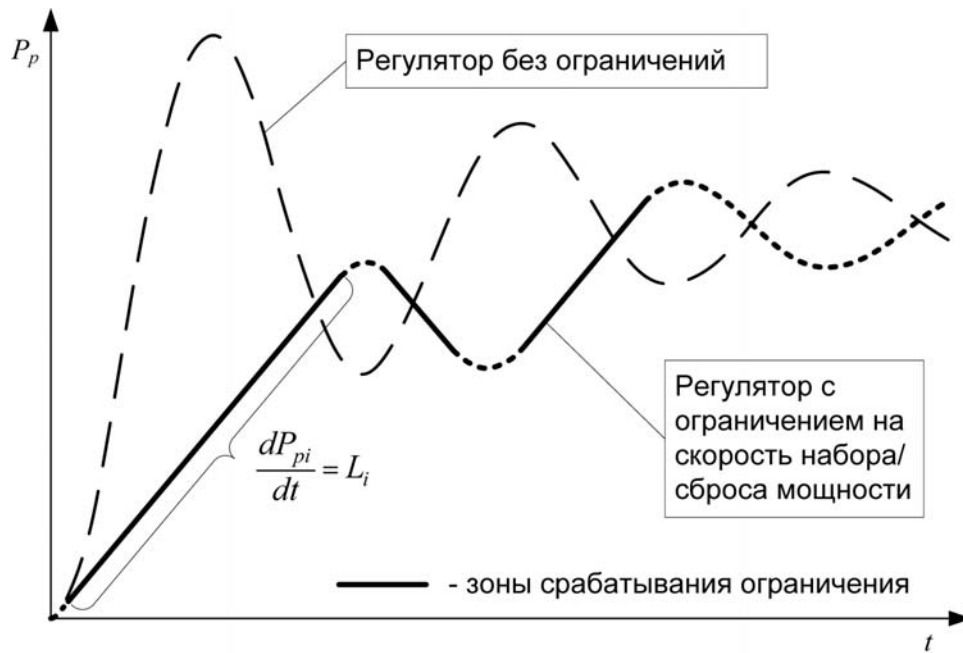
$$L_{chnpk} \leq \frac{dP_{npk}(t)}{dt} \leq L_{nlmpk}, t = [t_0, t_1], P_{npk} = [P_{npkh1}, P_{npkh2}] \quad (4)$$

где  $t = [t_0, t_1]$  – интервал времени, на котором исследуются процессы в энергосистеме с АРЧМ;

$g, h$  – индексы, обозначающие интервалы мощности регулятора, в которых действует данное ограничение скорости, таким образом:

$[P_{zpsg1}, P_{zpsg2}]$  – интервал мощности, в котором действует  $g$ -е ограничение  $L_{cgzps}$  на сброс мощности и  $L_{ngzps}$  на набор мощности ГР. Аналогично определяется  $h$ -й интервал  $[P_{cpkh1}, P_{cpkh2}]$  для ПР.

Зависимость скоростей набора/сброса мощности от интервала, к которому принадлежит текущая мгновенная мощность, обусловлена технологическими особенностями регуляторов. Например, в случае внепланового изменения мощности генератора-регулятора скорость начального скачка мощности значительно превышает скорость набора после отработки (набора) определенной величины мощно-



**Рис. 3.** Влияние ограничения на скорость набора/сброса мощности на переходный процесс регулятора

сти [4]. На рис. 3. проиллюстрировано действие рассматриваемого ограничения без учета зависимости от интервалов мощностей.

Как видно из рис. 3, ограничение на скорость набора/сброса мощности, приводит к ухудшению качественных характеристик процесса регулирования в рамках математической модели. Однако в реальной системе, при условии определения наиболее эффективных параметров закона регулирования, это приведет к уменьшению длительности регулирования и к улучшению режима работы регулятора (в том числе – к минимизации колебательных явлений в переходных процессах).

Это технологическое ограничение, наряду с зоной нечувствительности и ограничением на максимальную/минимальную мощность регулятора, также отражает фактическую нелинейность энергосистемы, и его учет повышает общую степень адекватности математической модели. Однако для этого запись математической модели должна иметь канонический вид, т. е. такой, когда производные от динамических переменных определены явным образом. Это облегчит численное моделирование и позволит использовать общеизвестные численные методы с их минимальной модификацией. В противном случае возникнет необходимость в разработке новых численных методов, способ-

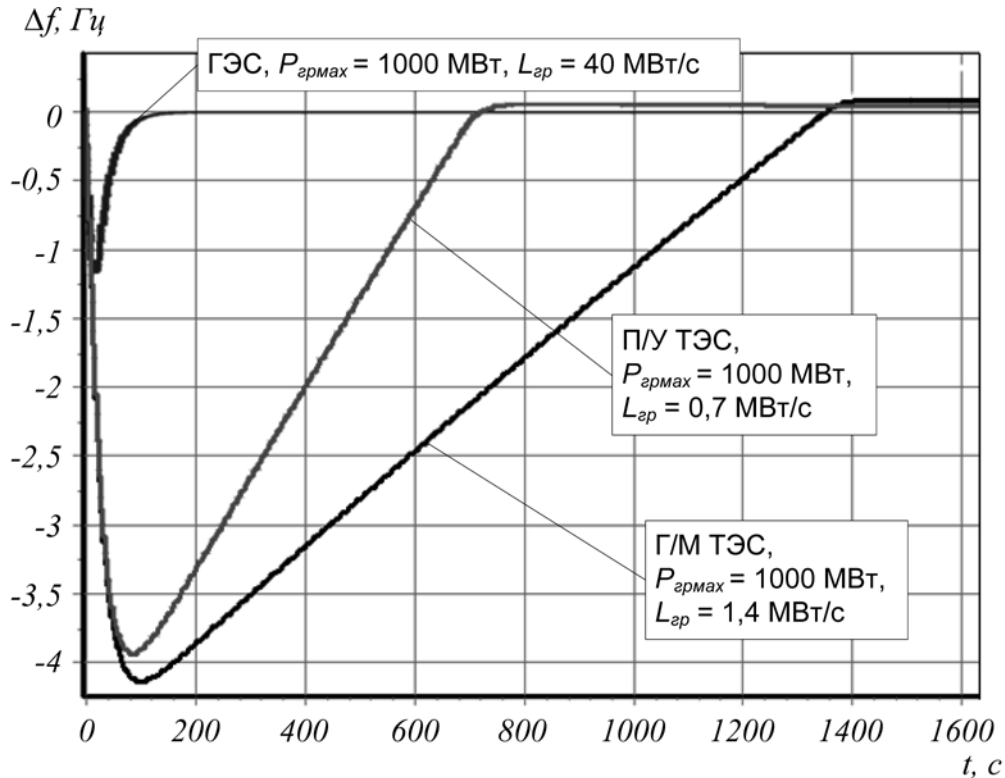
ных рассчитать математическую модель с системой нелинейных дифференциальных уравнений и ограничений.

**Средства численного решения задач математического моделирования.** Существующие программно-информационные комплексы (ПИК), реализующие те или иные численные методы, обладают рядом функциональных ограничений, которые не позволяют полноценно учесть нелинейные ограничения в математической модели.

Кроме того, существенной характеристикой ПИК для проведения необходимых исследований является простота его использования. Это обусловлено, в том числе тем, что разрабатываемая математическая модель не является оптимальной. Иными словами, поиск наиболее эффективной конфигурации параметров модели в соответствии с принятыми критериями заключается в многократном последовательном варьировании этих параметров.

Наиболее известными ПИК, используемыми для решения задач подобного рода (в том числе – широкого спектра прочих математических задач), являются следующие:

- MathCAD – позволяет решать системы линейных дифференциальных уравнений, однако без учета нелинейных ограничений, что неприемлемо, несмотря на удобство использования в части скорости моделирования, расче-



**Рис. 4.** Отклонение частоты в энергосистеме с ГР

тов, ввода/вывода параметров и результатов (в том числе путем экспорта в стандартное офисное программное обеспечение).

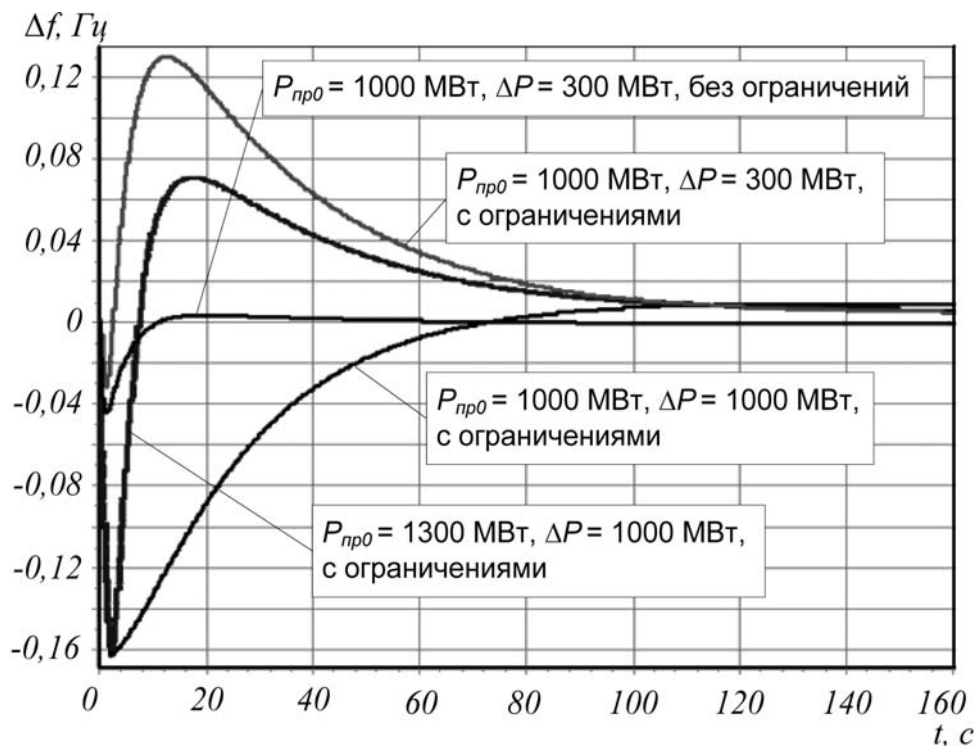
- **MatLab** – мощный инструмент математического моделирования, широко используемый при моделировании систем автоматического регулирования (с использованием графического представления передаточных функций), функционально покрывающий MathCAD, и, в целом, позволяющий учитывать нелинейные ограничения. Тем не менее, это приводит к утрате канонической записи системы дифференциальных уравнений, следствием чего является высокая сложность как моделирования этих ограничений, так и всего процесса исследования. Кроме того, процесс сопоставления полученных результатов, как следствие, представляет собой отдельную математическую задачу.

- **Maple** – программное обеспечение, по возможностям и удобству использования стоящее посередине между MathCAD и MatLab. При этом оно также не позволяет учитывать нелинейные ограничения и вносить изменения в алгоритм численного решения.

**Численное решение системы дифференциальных уравнений с учетом нелинейных**

**ограничений.** Перечисленные ПИК, предназначенные для решения задач математического моделирования, не обладают необходимыми функциональными возможностями для численного моделирования (особенно что касается учета нелинейных ограничений и возможностей варьирования параметров модели). Кроме того, численные методы, реализованные в этих ПИК, не могут быть подвергнуты модификации – большинство из них представляют собой черный ящик, соответствующие алгоритмы не задокументированы и представляют собой закрытый код. В связи с этим для решения системы дифференциальных уравнения с ограничениями был разработан специализированный ПИК, реализующий модифицированный численный метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

Путем последовательного варьирования параметров математической модели в ПИК получены количественные характеристики соответствующих переходных процессов для случаев работы в АРЧМ, где в качестве вторичных регуляторов используются пылеугольные (П/У) и газомазутные (Г/М) теплоэлектростанции (ТЭС) и гидроэлектростанции (ГЭС), см. рис. 4.



**Рис. 5.** Отклонение частоты в энергосистеме с ПР

Наибольшее влияние на длительность переходного процесса с ГР оказывает ограничение на скорость изменения мощности регулятора  $L_{гр}$ . При этом в ходе экспериментов с моделью установлено, что на величину максимального отклонения частоты  $\Delta f_{max}$ , помимо ограничения  $L_{гр}$ , также существенное влияние оказывает ограничение на максимальную мощность регулятора  $P_{грmax}$ . Учет зоны нечувствительности регуляторов при заданных величинах  $L_{гр}$  и  $P_{грmax}$  практически не влияет на характер переходного процес-

са, причем это касается и случая, когда в качестве вторичных регуляторов задействуются ПР. Графики отклонения частоты в энергосистеме с ПР при различных ограничениях (в том числе и без них) приведены на рис. 5.

Сопоставление параметров переходных процессов в системе АРЧМ, возникших в результате возникновения дефицита мощности (1000 МВт) при условии действия ПИД-закона регулирования (для ГР и для ПР), приведено в таблице.

**Таблица – Сравнение работы регуляторов при различных ограничениях**

| Тип регулятора | Ограничение         | $L_{гр}$ , МВт/с | $P_{пр0}$ , МВт | $P_{грmax}$ ,<br>$P_{прmin}$ , МВт | $\Delta f_{max}$ , Гц | $t_{\Delta}$ , с |
|----------------|---------------------|------------------|-----------------|------------------------------------|-----------------------|------------------|
| ГР             | Без ограничений     | 0                | -               | 1150                               | -1,3                  | 50               |
|                | ГЭС                 | 40               | -               | 1000                               | -1,4                  | 85               |
|                | Газомазутная ТЭС    | 1,4              | -               | 1000                               | -3,9                  | 720              |
|                | Пылеугольная ТЭС    | 0,7              | -               | 1000                               | -4,1                  | 1360             |
| ПР             | Без ограничений     | 0                | 1000            | -10                                | -0,6                  | 30               |
|                | $P_{прmin} = 0$ МВт | 500              | 1000            | 0                                  | -1,65                 | 120              |
|                |                     | 500              | 1300            | 50                                 | -1,65                 | 100              |

$P_{пр0}$  – максимальная регулируемая мощность ПР,

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

$t_{\Delta}$  – длительность переходного процесса,

$P_{грmax}$ ,  $P_{прmin}$  – максимальная и минимальная мощность ГР и ПР соответственно.

Для всех регуляторов с ограничениями, зона нечувствительности  $\Delta f_3 = 0,02$  Гц.

Из приведенной таблицы видно, что ключевые характеристики переходного процесса (максимальное отклонение частоты  $\Delta f_{max}$  и длительность  $t_{\theta}$ ) при расчете модели без ограничений отличаются в несколько раз от характеристик переходного процесса с ограничениями (что справедливо и для ПР, и для ГР). Таким образом, математическое моделирование переходных процессов в АРЧМ без учета технологических ограничений приводит к значительным погрешностям расчетов.

## ВЫВОДЫ

1. Существующие универсальные ПИК не обладают достаточной функциональностью для проведения экспериментов с математическими моделями, в состав которых входят системы дифференциальных уравнений с нелинейными ограничениями.

2. Учет технологических ограничений АРЧМ приводит, прежде всего, к увеличению максимального отклонения частоты в переходном процессе и к увеличению его длительности по отношению к результатам расчета в математической модели без ограничений.

3. Наибольшее влияние на переходный процесс, возникший в результате ударного возмущения, оказывают ограничения на скорость набора/сброса мощности регулятора и на допустимый уровень его мощности.

4. Эффективность работы АРЧМ с учетом технологических ограничений при использовании ПР в качестве вторичных регуляторов

превышает эффективность АРЧМ с использованием ГР.

5. Нелинейные ограничения оказывают существенное влияние на расчет переходных процессов регулирования частоты и мощности. Неучет этих ограничений, как это делается в большинстве публикаций, приводит к большим погрешностям и является недопустимым.

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. Дрёмин И.В. Исследование режимов работы автоматической системы регулирования частоты и мощности с регулирующими генераторами // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 4 (24). – С.11–18.

3. Дрёмин И.В. Моделирование режимов работы системы АРЧМ с потребителями-регуляторами // Проблеми загальної енергетики. – 2011. – Вип. 2 (25). – С. 5–10.

4. Вимоги до регулювання частоти і потужності в ОЕС України: СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.156:2009. Чинний від 2009-05-23. – Київ: Мінпаливенерго, 2009. – 54 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України. Настанова).

*Надійшла до редакції 30.05.2012*