

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗОК НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГООБЛОКОВ

Кулаков Г.Т., Артёмов К.И.

БНТУ, Минск, Республика Беларусь, ArtsiomenkaKiryl@bntu.by

Неравномерность графиков электрических нагрузок Белорусской энергосистемы, а также планируемый ввод двух энергоблоков Белорусской АЭС, заставляет мощные энергоблоки тепловых электрических станций участвовать в регулировании частоты и перетоков мощности. В то же время для определения оптимальных настроек и структуры системы автоматического управления мощностью энергоблока (САУМБ) и для выбора способа адаптации параметров динамической настройки технологических регуляторов, нужно провести анализ динамических характеристик главных участков регулирования энергоблока в диапазоне от минимальной до максимальной нагрузки.

Динамические характеристики изучались на газомазутном прямоточном котле Лукомльской ГРЭС типа ТГМП-314, объединенном в блок с турбиной К-300-240 ЛМЗ. Рабочим диапазоном данных энергоблоков является нагрузка 100 – 30 % номинальной мощности (переход в режим переменного давления происходит при нагрузке меньше 70 %). Моноблоки производительностью 1050 т / ч имеют 16 горелок (по 5 т/ч), 2 дутьевых вентилятора, 2 дымососа, 2 вентилятора рециркуляции и 2 регенеративных воздухоподогревателя.

Динамические характеристики энергоблока определялись в виде переходных характеристик по мощности и давлению пара перед турбиной при возмущении суммарной нагрузкой котла, т.е. согласованной подачей топлива, воздуха и питательной воды, а также перемещением регулирующих клапанов турбины, определяемым по давлению рабочей жидкости под золотником сервомоторов турбины [1].

Энергоблок мощностью 300 МВт с целью повышения экономичности процесса в диапазоне от 100 до 30 %, работает в двух режимах [2]:

– от 100 до 70% – давление пара постоянное – режим постоянного давления. Для уменьшения нагрузки прикрывают регулирующие клапана турбины, уменьшая тем самым расход пара, следовательно уменьшая электрическую мощность генератора;

– во вторичном режиме работы от 70 до 30 % уменьшение электрической мощности достигается за счёт того, что блок переходит в режим скользящего, т.е. переменного давления пара перед турбиной. Чем меньше нагрузка, тем меньше давление пара перед турбиной, чтобы обеспечить меньший расход пара перед турбиной при меньшей нагрузке.

Работа энергоблока в широком диапазоне изменения нагрузки приводит к существенному ухудшению динамических характеристик по электрической мощности и давлению пара перед турбиной с уменьшением нагрузки энергоблока. Количественное изменение этих параметров можно оценить с использованием данных таблицы 1, в которой приведены коэффициенты передачи и постоянные времени следующих передаточных функций объектов управления [3]:

– передаточная функция по электрической мощности при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки:

$$W_{N_{ф.Бт}}(p) = \frac{K_1 e^{-\tau_1 p}}{(T_1 p + 1)(\sigma_1 p + 1)}, \quad (1)$$

где  $K_1$  – коэффициент передачи, МВт / %;

$\tau_1$  – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия, с;

$T_1$  – большая постоянная времени передаточной функции, с;

$\sigma_1$  – меньшая постоянная времени передаточной функции, с.

– передаточная функция по давлению перегретого пара перед турбиной при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки:

$$W_{p_0, B_i}(p) = \frac{K_2 e^{-\tau_2 p}}{(T_2 p + 1)(\sigma_2 p + 1)}, \quad (2)$$

где  $K_2$  – коэффициент передачи, МПа / %;

$\tau_2$  – время запаздывания по каналу регулирующего воздействия, с;

$T_2$  – большая постоянная времени передаточной функции, с;

$\sigma_2$  – меньшая постоянная времени передаточной функции, с.

– передаточная функция по электрической мощности при скачкообразном перемещении регулирующих клапанов турбины:

$$W_{N_{\Phi}, h_{\text{ПК}}}(p) = \frac{T_0 p (T_3 p + 1)}{(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)}, \quad (3)$$

где  $T_0, T_3, T_4$  и  $T_5$  – постоянные времени передаточной функции, с.

– передаточная функция по давлению перегретого пара перед турбиной при скачкообразном перемещении регулирующих клапанов турбины:

$$W_{p_0, h_{\text{ПК}}}(p) = \frac{K_3 (T_6 p + 1)}{T_7 p + 1}, \quad (4)$$

где  $K_3$  – коэффициент передачи, МПа / %;

$T_6$  и  $T_7$  – постоянные времени передаточной функции, с.

Таблица 1 – Изменение величин коэффициентов и постоянных времени передаточных функций объекта регулирования системы автоматического управления мощностью энергоблока в функции от нагрузки

Нагрузка, %	30	50	100
$K_1$ , МВт / %	4,8	3,5	1,6
$\tau_1$ , с	32,5	25,0	11,2
$T_1$ , с	97,0	152,0	101,0
$\sigma_1$ , с	18,2	29,0	19,0
$K_2$ , МПа / %	4,8	3,0	1,6
$\tau_2$ , с	31,4	16,0	6,1
$T_2$ , с	78,4	51,0	56,0
$\sigma_2$ , с	19,6	13,0	14,0
$T_0$ , с	1019,0	509,4	169,8
$T_3$ , с	13,7	7,0	2,3
$T_4$ , с	1008,0	504,0	168,0
$T_5$ , с	128,0	144,0	48,0
$K_3$ , МПа / %	-0,7	-0,42	-0,25
$T_6$ , с	27,6	14,0	4,6
$T_7$ , с	540,0	270,0	90,0

Для построения динамических характеристик энергоблока 300 МВт будем использовать пакет программного обеспечения Simulink Matlab, принципы работы в котором объяснены в [4].

Передаточная функция (1) аппроксимировалась инерционным звеном второго порядка с условным запаздыванием. На рисунке 1 изобразим динамические характеристики по электрической мощности при скачкообразном изменении задания котельному регулятору мощности для различных значений нагрузки энергоблока с помощью формулы (1) и таблицы 1:

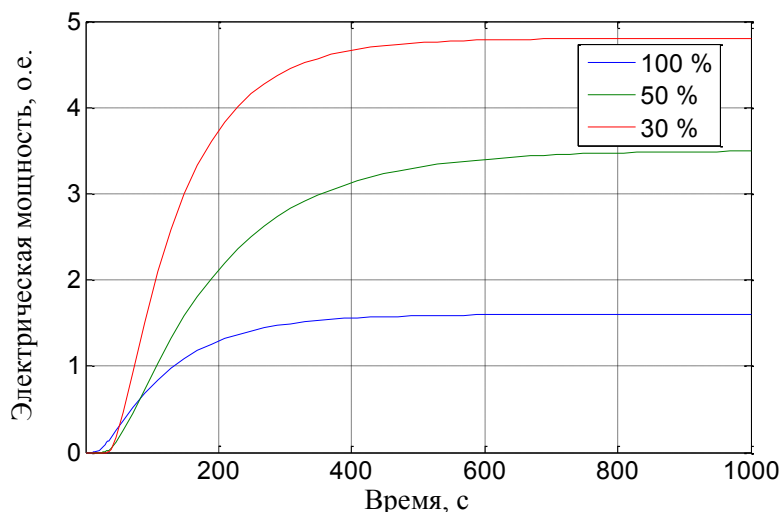


Рисунок 1 – Электрическая мощность при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки

Из анализа динамических характеристик, приведенных на рисунке 1 следует, что коэффициент передачи передаточной функции по электрической мощности при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки с уменьшением нагрузки от 100 до 30 % увеличивается в 3 раза. При этом запаздывание по каналу регулирующего воздействия увеличивается в 2,9 раза. Большая постоянная времени передаточной функции (1) с уменьшением нагрузки от 100 до 50 % увеличивается в 1,5 раза, а затем уменьшается в 1,6 раза, а меньшая постоянная времени увеличивается соответственно при 50 % нагрузке в 1,6 раза, затем при 30 % нагрузке уменьшается в 1,6 раза.

Передаточная функция (2) представляет собой инерционное звено второго порядка с условным запаздыванием. На рисунке 2 построены динамические характеристики по давлению перегретого пара перед турбиной при скачкообразном изменении задания котельному регулятору мощности для различных значений нагрузки энергоблока с помощью формулы (2) и таблицы 1:

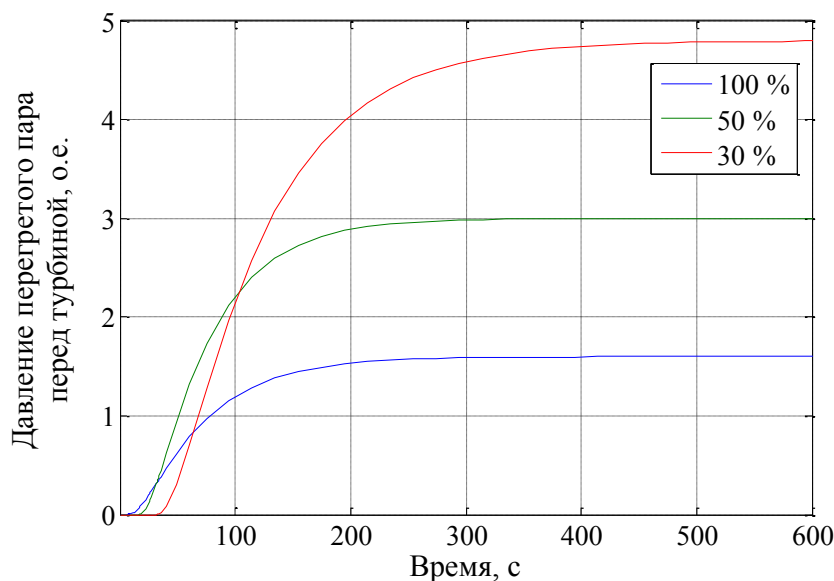


Рисунок 2 – Давление перегретого пара перед турбиной при скачкообразном изменении задания котельному регулятору нагрузки

Коэффициент передачи передаточной функции (рисунок 2) при минимальной нагрузке в 3 раза больше, чем при максимальной, а запаздывание по каналу регулирующего увеличи-

вается в 5,1 раза. Большая и меньшая постоянные времени соответственно увеличиваются в 1,4 раза при изменении нагрузки от 100 до 30 %. Но при этом для 50 % нагрузки большая постоянная времени снижается на 9 % по сравнению с полной мощностью, а меньшая постоянная времени – на 7 %.

Передаточная функция (3) по мощности при возмущении регулирующими клапанами турбины представлена последовательным соединением реального дифференциатора и звена медленного реагирования, т.к. постоянная времени числителя интегро-дифференцирующего звена  $T_3$  меньше постоянной времени знаменателя  $T_5$ . На рисунке 3 изобразим динамические характеристики по электрической мощности при скачкообразном перемещении регулирующих клапанов турбины для различных значений нагрузки энергоблока с помощью формулы (3) и таблицы 1:

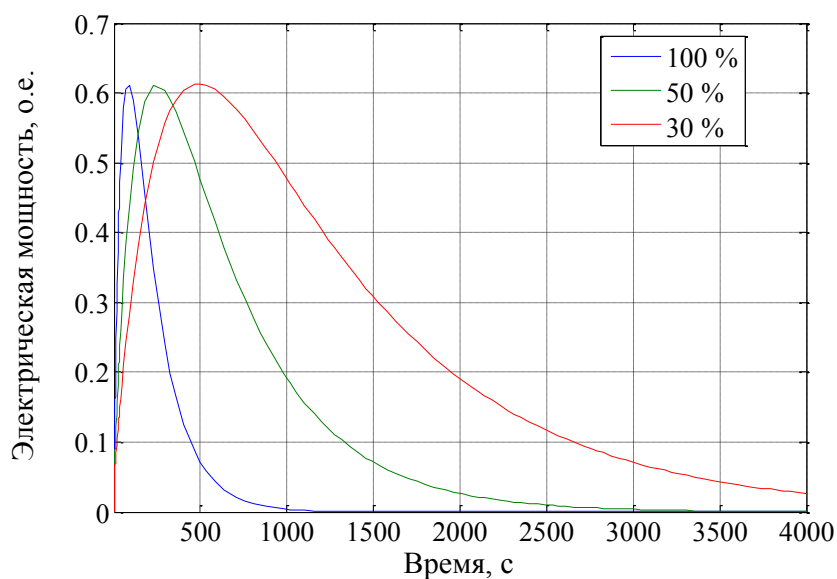


Рисунок 3 – Электрическая мощность при скачкообразном перемещении регулирующих клапанов турбины

Время достижения максимального значения отклонения по мощности при половинной нагрузке в 2,6 раза больше, чем при максимальной, а при минимальной нагрузке увеличивается в 5,7 раза по сравнению с максимальной. Полное время регулирования при нагрузке, равной 50 %, в 3 раза больше, чем при 100 %, а при 30 % нагрузке увеличивается в 5 раз по сравнению с максимальной.

Передаточная функция (4) аппроксимированы в виде звена медленного реагирования. Следует отметить, что при открытии регулирующих клапанов турбины давление перегретого уменьшается, т.е. коэффициент передачи по давлению отрицательный. На рисунке 4 построены динамические характеристики по давлению перегретого пара перед турбиной при скачкообразном перемещении регулирующих клапанов турбины для различных значений нагрузки энергоблока с помощью формулы (4) и таблицы 1:

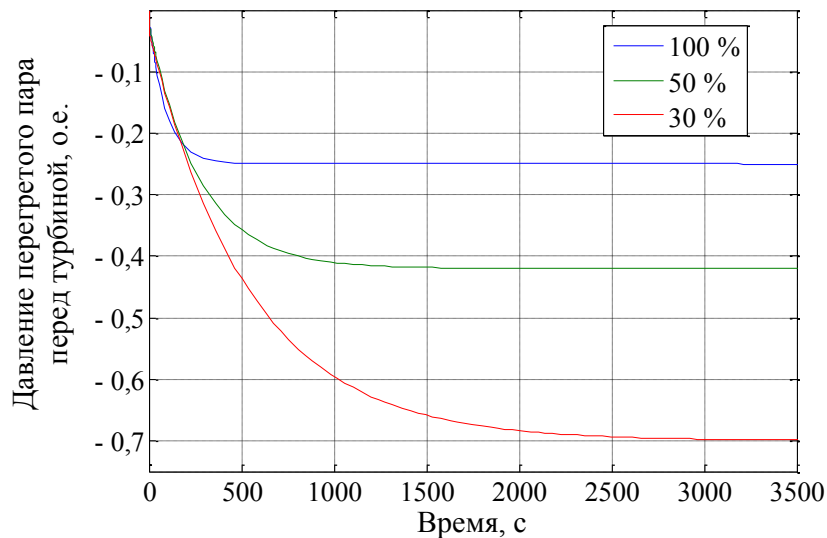


Рисунок 4 – Давление перегретого пара перед турбиной при скачкообразном перемещении регулирующих клапанов турбины

Коэффициент передачи передаточной функции (рисунок 4) при минимальной нагрузке в 2,8 раза больше, чем при максимальной, а при половинной нагрузке больше в 1,7 раза. Время достижения установившегося значения давления перегретого пара при 50 % нагрузке в 3 раза больше, чем при 100 %, а при 30 % нагрузке увеличивается в 6 раз по сравнению со 100 %.

## ВЫВОДЫ

1. Динамические характеристики энергоблока как по мощности, так и по давлению перегретого пара в режиме скользящего давления существенно ухудшаются с уменьшением нагрузки.
2. Этот фактор необходимо учитывать при синтезе оптимальной структуры и параметрической оптимизации САУМБ, работающей в широком диапазоне изменения нагрузок, с целью сохранения высокого качества поддержания задания мощности и минимизации отклонений давления перегретого пара перед турбиной при глубоких изменениях нагрузок.
3. Для этого необходимо вместо поиска оптимальных настроек для всего диапазона изменения мощности использовать адаптивные настройки, изменяющиеся вместе с увеличением или снижением нагрузки энергоблока.
4. Для расчета адаптивных настроек необходимо знать величины коэффициентов передачи, постоянных времени и условных запаздываний для любого из уровней нагрузки энергоблока, чего можно добиться при помощи аппроксимации их функциональных зависимостей.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Койчу, М.Б. Особенности экспериментальных динамических характеристик парогенератора ТГМП-314 моноблока мощностью 300 МВт / М.Б. Койчу // Теплоэнергетика. – 1976. – № 2. – С. 22–27.
2. Иванов, В.А. Режимы мощных паротурбинных установок / В.А. Иванов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат, 1986. – 247 с.
3. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учеб. пособие / Г. Т. Кулаков [и др.]; под общ. ред. Г. Т. Кулакова. – Минск: Выш. шк., 2017. – 238 с.
4. Дьяконов, В.П. Matlab 7. R2006, R2007 / В.П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 768 с.