

УДК 621.313.32.317

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ПАРОВЫХ ТУРБИН ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ
ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИМПУЛЬСНОЙ РАЗГРУЗКИ**

А.М. Ларин, А.А. Булгаков

ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
г. Донецк, ДНР, Российская Федерация

Предлагается способ аналитического представления экспериментальных импульсных характеристик паровых турбин полиномиальными функциями высокого порядка. Получены математические соотношения, позволяющие аналитически описывать импульсные характеристики для любой заданной интенсивности и продолжительности воздействия.

A method is proposed for the analytical representation of experimental impulse characteristics of steam turbines by high-order polynomial functions. Mathematical relations have been obtained that make it possible to analytically describe the impulse characteristics for any given intensity and duration of influence.

Ключевые слова: *импульсная характеристика, полиномиальная функция, интенсивность, продолжительность воздействия.*

Keywords: *impulse response, polynomial function, intensity, duration of influence.*

В настоящее время в электроэнергетических системах (ЭЭС) для предотвращения нарушения динамической устойчивости широко используется противоаварийная автоматика (ПА) [1] балансирующего действия путем изменения момента турбины. При этом в избыточных узлах ЭЭС осуществляется импульсная разгрузка (ИРТ), которая может сочетаться с ограничением мощности (ОМТ).

Поведение ЭЭС при воздействии на момент турбины зависит от условий работы, вида возмущающего воздействия, импульсной характеристики, параметров сети и др. Поэтому, для оценки эффективности применения ИРТ в подсистеме автоматического предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) необходим в каждом конкретном случае количественный анализ электромеханических переходных процессов.

Дозировка интенсивности импульсного воздействия на систему регулирования турбины производится по результатам анализа

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ**

переходных процессов с учетом экспериментально полученных импульсных характеристик, представляющих собой зависимости глубины разгрузки турбин от параметров импульса, с учетом предшествующего режима и тяжести аварии.

При экспериментальном определении импульсных характеристик [2] осуществляется воздействие прямоугольными импульсами, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры типовых экспериментальных импульсов

Интенсивность, h_u	Длительность импульса, с						
	0,5	–	–	–	0,10	0,15	0,25
1,0	0,05	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7
2,0	0,05	0,1	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7
3,0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,5	0,7
4,0	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3	0,5

Импульсы характеризуются двумя параметрами: длительностью t_u в секундах и интенсивностью сигнала h_u в относительных единицах.

Для отработки методики определения оптимальных управляющих воздействий в математических моделях необходимо иметь аналитическое описание импульсных характеристик для различной интенсивности h_u и длительности воздействия t_u , соответствующих табл. 1.

На рис. 1 приведены найденные в литературе [3], графические зависимости некоторых экспериментальных импульсных характеристики одного из энергоблоков.

Целью настоящей работы является аналитическое представление на основе исходных четырех экспериментальных зависимостей, позволяющее определять импульсные характеристики для любой заданной интенсивности и продолжительности его воздействия, соответствующих типовым характеристикам (табл. 1).

В работе предложен способ аппроксимации импульсных характеристик полиномиальными функциями.

Для этого осуществлялось графическое построение исходных экспериментальных характеристик и производился замер координат с дискретностью $\Delta t = 0,01c$. Результаты такого графического построения представлены на рис. 1.

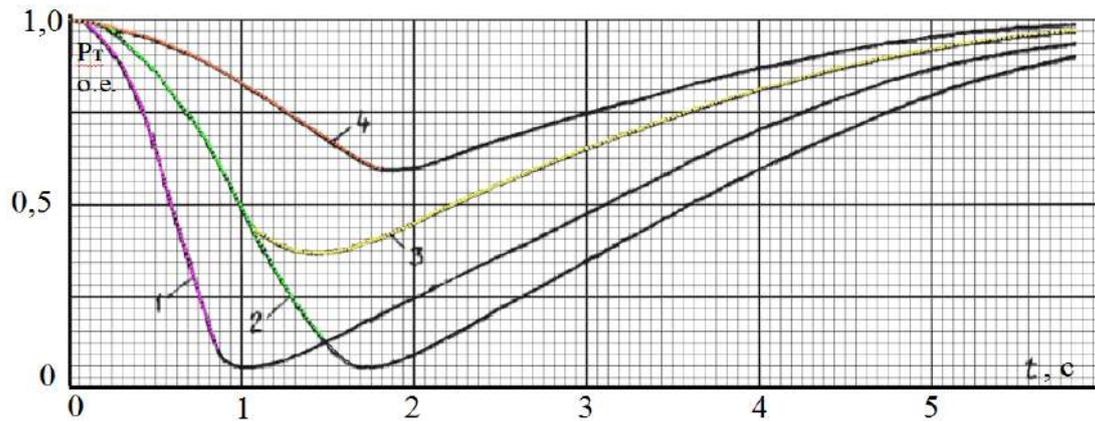


Рисунок 1 – Дискретное представление экспериментальных импульсных характеристик

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1) – $h_u = 4, t_u = 0,3$ с; | 2) – $h_u = 3, t_u = 0,5$ с; |
| 3) – $h_u = 3, t_u = 0,3$ с; | 4) – $h_u = 1, t_u = 0,6$ с. |

Предлагаемый подход основан на аналитическом представлении импульсных характеристик полиномами высокого порядка на трех временных участках.

Первый участок характеризуется линейной функцией (мощность турбины в исходном режиме не изменяется) $P_0(t) = P_0 = const$. Длительность запаздывания во времени принята одинаковой для всех характеристик различной интенсивности и равной $T_0 = 0,1$ с.

Второй участок представляется полиномиальной функцией $P_1(t)$ и зависимостью определения момента времени запаздывания после снятия импульсного воздействия $T_1(t_u)$. Анализ этого диапазона изменения мощности показал, что характер снижения момента турбины зависит от интенсивности h_u . Степень уменьшения определяется длительностью импульса t_u .

Для определения зависимости $P_1(t)$ второго участка использовалась полиномиальная аппроксимация с применением метода наименьших квадратов.

Путем повышения степени полинома было определено оптимальное значение его степени. Для данного участка – шестая степень. В этом случае полиномиальная функция $P_1(t)$ для рассматриваемого участка имеет вид:

$$P_1(t) = a_{1,6} \cdot t^6 + a_{1,5} \cdot t^5 + a_{1,4} \cdot t^4 + a_{1,3} \cdot t^3 + a_{1,2} \cdot t^2 + a_{1,1} \cdot t + a_{1,0}, \quad (1)$$

где $a_{1,6} - a_{1,0}$ – коэффициенты полиномиальной функции (1).

Полученные в ходе аппроксимации коэффициенты функции $P_1(t)$ для исходных экспериментальных импульсных характеристик

приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты аппроксимации второго участка
экспериментальных импульсных характеристик

Коэффициент функции	Параметры импульса			
	$h_u = 4$	$h_u = 3$	$h_u = 2$	$h_u = 1$
$a_{1.6}$	-0,059596	-0,002614	-0,000969	-0,000083
$a_{1.5}$	0,567735	0,041985	0,016279	0,002438
$a_{1.4}$	-2,161853	-0,265985	-0,109085	-0,024600
$a_{1.3}$	4,181454	0,838973	0,369688	0,116996
$a_{1.2}$	-4,294957	-1,359848	-0,660177	-0,283431
$a_{1.1}$	0,692670	0,262804	0,108691	0,025708
$a_{1.0}$	0,967565	0,983612	0,989690	0,992962
$b_{1.1}$	1,056300	1,336000	1,339500	1,341400
$b_{1.0}$	0,523100	0,661600	0,663400	0,664300

Момент времени, отражающий запаздывание после снятия импульсного воздействия, зависящий от параметров импульса (интенсивности h_u и длительности t_u) определялся в соответствии со следующим соотношением заданной интенсивности импульса:

$$T_1(t_u) = b_{1.1} \cdot t_u + b_{1.0}, \quad (2)$$

где $b_{1.1}$, $b_{1.0}$ – коэффициенты функции (2).

Полученные в ходе аппроксимации коэффициенты $b_{1.1}$ и $b_{1.0}$ для каждой отдельной экспериментальной импульсной характеристики также приведены в табл. 2.

Третий участок представляет собой *идентичный* для всех характеристик отрезок, отражающий запаздывание и увеличение мощности после того, как прекратилось импульсное воздействие. Для этого интервала путем параллельного переноса соответствующей характеристики вдоль оси времени и масштабирования относительно оси мощности турбины были получены коэффициенты полинома девятого порядка. В качестве исходных данных для аппроксимации был использован соответствующий отрезок импульсной характеристики со следующими параметрами: $h_u=3$; $t_u=0,3$ с.

Выбор этого участка обусловлен явно выраженным моментом запаздывания после снятия импульсного воздействия. Для последующей аппроксимации, параллельного переноса и масштабирования данный участок был смещен по оси времени t к началу координат ($t-T_1$) и перенесен по оси мощности P на $-P_0$. Указанные графические построения показаны на рис. 2.

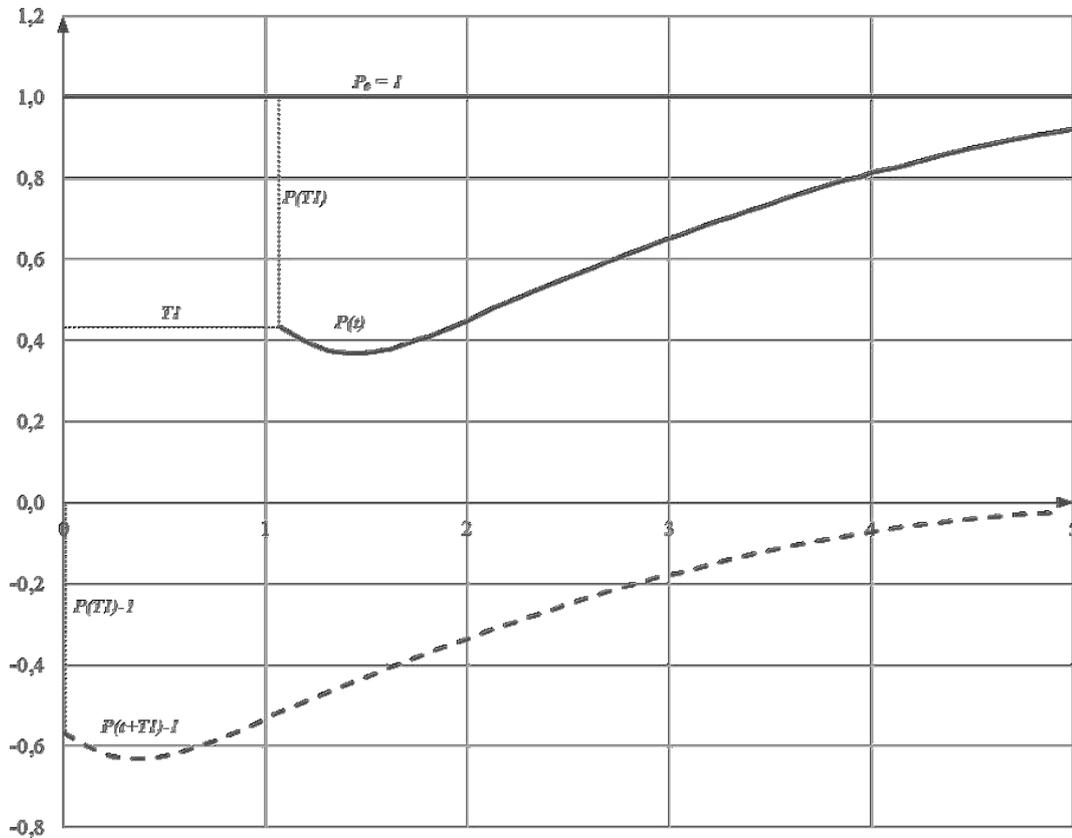


Рисунок 2 – Графические построения, поясняющие аппроксимацию третьего участка

На основании исследований было установлено, что для обеспечения точности аппроксимации, не превышающей 1%, оптимальная степень полинома для данного участка должна быть не менее девятой. Полиномиальная функция $P_2(t)$ для третьего участка имеет вид:

$$P_2(t) = k_p [a_{2,9}(t - \Delta T)^9 + a_{2,8}(t - \Delta T)^8 + a_{2,7}(t - \Delta T)^7 + a_{2,6}(t - \Delta T)^6 + a_{2,5}(t - \Delta T)^5 + a_{2,4}(t - \Delta T)^4 + a_{2,3}(t - \Delta T)^3 + a_{2,2}(t - \Delta T)^2 + a_{2,1}(t - \Delta T)^1 + a_{2,0}] + 1, \quad (3)$$

где $a_{2,9} - a_{2,0}$ – коэффициенты полиномиальной функции (3); $k_p = \frac{P_1(T_1) - 1}{P_2(T_1, \Delta T, 1)}$ – коэффициент масштабирования графика относительно оси мощности P ; $\Delta T = T_1$ – значение параллельного переноса графика относительно оси времени t .

Коэффициент масштабирования k_p используется для приведения третьего участка полиномиальной функции к моменту начала запаздывания после снятия импульсного воздействия, т.е. концу второго участка $P_1(T_1)$.

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ,
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ**

Полученные в ходе аппроксимации участка $P_2(t - T_1) - 1$, приведенного на рис. 2, коэффициенты полиномиальной функции $P_2(t)$, одинаковые для любой характеристики, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения коэффициентов полиномиальной функции, аппроксимирующей третий участок импульсных характеристик

Коэффициент функции (3)	Значение	Коэффициент функции (3)	Значение	Коэффициент функции (3)	Значение
$a_{2.0}$	-0,56142	$A_{2.1}$	-0,46137	$a_{2.2}$	0,972307
$a_{2.3}$	-0,72495	$A_{2.4}$	0,311111	$a_{2.5}$	-0,081634
$a_{2.6}$	0,013122	$A_{2.7}$	-0,00125	$a_{2.8}$	0,0000637
$a_{2.9}$	-0,0000013	-	-	-	-

Таким образом, полученные в работе функциональные зависимости позволяют аналитически определять импульсные характеристики для заданной интенсивности ($h_u = 1, 2, 3, 4$ нр) любой продолжительности его воздействия. Некоторые из расчетных характеристик приведены на рис. 3.

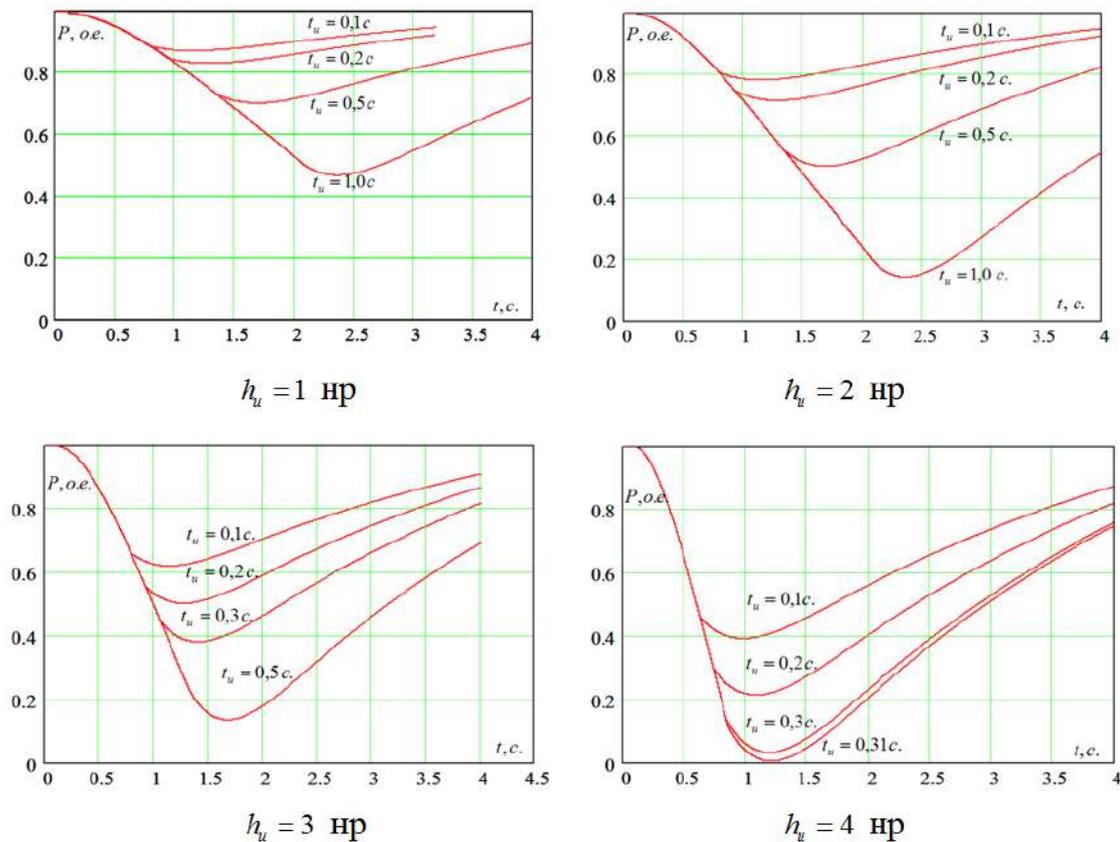


Рисунок 3 – Расчетные импульсные характеристики энергоблока

Выводы

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СИСТЕМ

1. Предложен способ аппроксимации экспериментальных импульсных характеристик тепловых энергоблоков на основе функционального представления полиномиальными зависимостями высокого порядка, что позволило на основе четырех экспериментальных зависимостей, определять импульсные характеристики для любой заданной интенсивности и продолжительности его воздействия.

2. Аналитическое описание импульсных характеристик при математическом моделировании электромеханических переходных процессов с учетом действия импульсной разгрузки турбины позволит более точно формировать управляющее воздействие на момент турбины для предотвращения нарушения динамической устойчивости ЭЭС при больших возмущениях.

Перечень ссылок

1. Стандарт СТО 59012820.29.240.001-2011. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Противоаварийная автоматика энергосистем. Условия организации процесса. Условия создания объекта. Нормы и требования. – Москва. - 2011. – 30с.

2. МУ 34-70-062-83. Методические указания по проверке и испытаниям автоматических систем регулирования и защит паровых турбин (СО 153-34.30.310, РД 34.30.310). Главное научно-техническое управление энергетики и электрификации РФ. Москва, ОРГРЭС, 1991. – 137 с.

3. Кощев, Л.А. Автоматическое противоаварийное управление в электроэнергетических системах / Л.А. Кощев. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1990. – 145 с.