

**В. П. СЕВЕРИН, Е. Н. НИКУЛИНА, А. С. ШЕВЦОВ**

## МОДЕЛЬ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ К-1000-60/1500-2 ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

**АННОТАЦИЯ** Приведены уравнения переходных режимов паровой турбины. Путем преобразования уравнений турбины построена нелинейная модель паровой турбины К-1000-60/1500-2 как объекта автоматического управления в относительных переменных состояниях, учитывающая экспериментальные данные регулирующих органов и использующая минимальное количество вычислений. На основании этой модели для исследования режима сброса нагрузки построены графики изменения переменных давления и частоты.

**Ключевые слова:** паровая турбина, объект управления, уравнения динамики, нелинейная модель, переходный режим.

**V. SEVERIN, E. NIKULINA, O. SHEVTSOV**

## MODEL OF STEAM TURBINE K-1000-60/1500-2 FOR CONTROL PROCESSES RESEARCH

**ABSTRACT** Presentation of model of steam turbine K-1000-60/1500-2 in the state space of relative variables is the aim of the article. Using the physics laws equations describing the dynamics of NPP steam turbine as an automation object in variable modes are considered. By transforming the equations of the dynamics nonlinear model of the steam turbine in relative state variables is built as a system of differential equations in the Cauchy form. The model takes into account the experimental data of regulators and uses a minimal amount of computations. Graphs of nonlinear functions of flow coefficients of the variables of servomotors coordinate values of the control valve and control flap, derived from the experimental data, are constructed. Formulas for the calculation and the calculated values of the constants parameters of the model are given. The input variables of the model are the coordinates of the servomotors of control valve and control flaps, as well as the power of the electric generator. On the basis of the turbine model for the study of the load shedding mode of electric generator graphs of pressure variables in steam volumes and speed of the rotor are constructed by numerical integration of the differential equations system for given functions of closing of servomotors of control valve and control flap. The maximum casting speed of turbine rotor is 7.36 % of the nominal frequency value. Similarly, nonlinear model of a steam turbine K-1000-60/1500-2 can be obtained. Models nuclear steam turbines in relative variables with the minimum number of calculations can be used to optimize the control system parameters of the steam turbine of nuclear power plant.

**Keywords:** steam turbine, object of control, dynamic equations, nonlinear model, transition mode.

### Введение

Для исследования процессов управления паровыми турбинами АЭС необходимы модели переходных режимов турбин [1, 2]. Разработана модель турбины К-1100-60/1500-2М энергоблока ВВЭР-1000 в абсолютных переменных состояниях для исследования импульсных разгрузок по командам противоаварийной автоматики [3]. Для исследования режима сброса нагрузки получена модель турбины К-220-4,4-3 блока ВВЭР-440 в относительных переменных состояниях, упрощающая исследование [4]. Необходимо разработать модель турбины К-1000-60/1500-2 в относительных переменных состояниях для исследования режима сброса нагрузки.

### Цель работы

Целью статьи является представление модели паровой турбины К-1000-60/1500-2 в относительных переменных для решения задач исследования процессов управления турбиной.

Для достижения намеченной цели рассматриваются уравнения переходных режимов паровой турбины как объекта управления в абсолютных переменных состояниях. Строится модель турбины

К-1000-60/1500-2 в относительных переменных, учитывающая экспериментальные данные регулирования. Приводятся графики режима сброса нагрузки.

### Уравнения динамики турбины

При записи уравнений динамики турбины полагаем, что в начальный момент времени все параметры и процессы находятся в стационарном равновесном состоянии, рабочие процессы расширения пара в отсеках турбины изоэнтропны, КПД отсеков постоянны и равны их номинальным значениям. Паровой тракт турбины разделяется на  $n_V$  постоянных объемов  $V_i$ ,  $i = \overline{1, n_V}$ . При большой массе нагретого металла вокруг проточной части турбины и быстрых переходных процессах дифференциальное уравнение (ДУ) изменения давления  $p_i$  в объеме турбины с номером  $i$  имеет вид

$$\frac{V_i}{p_{0i}v_{0i}} \cdot \frac{dp_i}{dt} = \Delta G_i, \quad (1)$$

где  $p_{0i}$  и  $v_{0i}$  – давление и удельный объем в номинальном режиме;  $\Delta G_i$  – приращение массового расхода пара [4]. Теоретический расход пара  $G_i$  через сечение площадью  $F$  определим уравнении

© В. П. Северин, Е. Н. Никулина, А. С. Шевцов, 2017

ем неразрывности  $G_t v = Fc$ , где  $v$  – теоретический удельный объем пара,  $c$  – теоретическая скорость пара. Отсюда

$$G_t = Fc/v. \quad (2)$$

При адиабатическом расширении пара через суживающееся сопло его теоретическая скорость в системе СИ определяется по формуле

$$c = \sqrt{\frac{2kp v}{k-1}} \sqrt{\varepsilon^{\frac{2}{k}} - \varepsilon^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (3)$$

где  $k$  – показатель адиабаты;  $p$  – давление пара в предыдущем объеме;  $\varepsilon$  – отношение давления пара в последующем объеме к давлению пара в предыдущем объеме. Подстановка (3) в (2) дает

$$G_t = F \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \frac{p}{v} \sqrt{\varepsilon^{\frac{2}{k}} - \varepsilon^{\frac{k+1}{k}}}. \quad (4)$$

С увеличением  $\varepsilon$  скорость  $c$  возрастает до максимально возможной критической скорости  $c_c$ . Приравняв производную (3) по  $\varepsilon$  нулю, найдем критическое значение

$$\varepsilon_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (5)$$

Подставляя это значение в (3) и (4), получим критические скорость и расход:

$$c_c = \sqrt{kp v \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad G_c = F \sqrt{k \frac{p}{v} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (6)$$

Для отношения теоретического и критического расходов  $\beta = G_t/G_c$  применяется формула Бендемана

$$\beta = \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}\right)^2}, \quad (7)$$

откуда

$$G_t = \beta G_c. \quad (8)$$

Обозначая

$$\chi = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}, \quad (9)$$

для критического расхода (6) получим

$$G_c = F \chi \sqrt{\frac{p}{v}}. \quad (10)$$

Для действительного расхода  $G = \mu G_t$ , где  $\mu$  – коэффициент расхода, из формул (8) и (10) имеем

$$G = \mu \beta F \chi \sqrt{\frac{p}{v}}. \quad (11)$$

Эта формула применяется при вычислении расхода пара через регулирующие органы. Расход пара, вытекающего из внутреннего отсека турбины с номером  $i$  в последующий отсек, вычисляется по формуле Флюгеля-Стодолы

$$G_i = G_{0i} \sqrt{\frac{p_i^2 - p_{i+1}^2}{p_i^2 - p_{0i+1}^2}}, \quad (12)$$

где  $G_{0i}$  – расход пара в номинальном режиме;  $p_i$  и  $p_{i+1}$  – давление пара в данном и последующем объемах;  $p_{0i}$  и  $p_{0i+1}$  – номинальные значения давления. Расход пара в отбор для объема турбины с номером  $i$  вычисляется по формуле

$$G'_i = G'_{0i} \sqrt{\frac{p_i - p'_i}{p_{0i} - p'_{0i}} \cdot \frac{p_i}{p_{0i}}}, \quad (13)$$

где  $G'_{0i}$  – значение расхода в отбор в номинальном режиме,  $p'_i$  и  $p'_{0i}$  – давление пара в отборе и его номинальное значение. Приращение расхода определится по формуле

$$\Delta G_i = G_{i-1} - G_i - G'_i - G''_i, \quad (14)$$

где  $G''_i$  – расход вследствие утечек пара. Подставляя приращения расходов из формулы (14) в ДУ (1), имеем систему ДУ (СДУ) для вычисления давления в паровых объемах при изменении режима работы турбины.

Уравнение движения ротора паровой турбины [4]

$$J \omega \frac{d\omega}{dt} = N - N_s, \quad (15)$$

где  $J$  и  $\omega$  – момент инерции и угловая скорость вращения ротора;  $N$  и  $N_s$  – механическая мощность турбины и мощность электрического генератора

$$N = \sum_{i \in I_N} N_{0i} \sqrt{\frac{p_i^2 - p_{i+1}^2}{p_i^2 - p_{0i+1}^2}} - N_l, \quad (16)$$

где  $N_{0i}$  – номинальное значение мощности, соответствующее паровому объему с номером  $i$ ;  $I_N$  – множество номеров объемов, определяющих ее мощность;  $N_l$  – потери мощности. Обозначим угловую скорость и мощность турбины в номинальном режиме через  $\omega_0$  и  $N_0$ .

Модель паровой турбины для переходного режима включает уравнения (1), (11)–(16).

### Модель турбины К-1000-60/1500-2

Для исследования переходного режима турбины К-1000-60/1500-2 выделим для нее паровые объемы: 1 – перед регулирующим клапаном (РК); 2 – за РК до отбора 1 за ступенью 3 цилиндра высокого давления (ЦВД); 3 – от отбора 1 за ступенью 3 до отбора 2 за ступенью 5 ЦВД; 4 – от отбора 2 за ступенью 5 до отбора 3 за ступенью 7 ЦВД; 5 – от выхлопа за ступенью 7 ЦВД до ступени 2 сепаратора-пароперегревателя (СПП); 6 – от ступени 2 СПП до регулирующей заслонки (РЗ); 7 – от РЗ до ступени 1 цилиндра низкого давления (ЦНД); 8 – от ступени 1 до отбора 4 за ступенью 2 ЦНД; 9 – от отбора 4 за ступенью 2 ЦНД до отбора

5 за ступеню 3 ЦНД; 10 – от отбора 5 за ступеню 3 ЦНД до отбора 6 за ступеню 4 ЦНД; 11 – от отбора 6 за ступеню 4 ЦНД до отбора 7 за ступеню 6 ЦНД; 12 – от отбора 7 за ступеню 6 ЦНД до выхлопа ЦНД. Число паровых объемов  $n_V = 12$ .

Зададим базовые значения времени и давления  $t_b = 1$  с и  $p_b = p_{01}$ , где  $p_{01} = 5,884$  МПа. Преобразуя ДУ (1) к относительным переменным состояния давления  $\pi_i = p_i/p_b$ ,  $\pi'_i = p'_i/p_b$  и времени  $\tau = t/t_b$ , найдем постоянные параметры  $r_i = p_{0i}v_{0i}t_b/V_{0i}$ . Тогда получим СДУ в виде Коши:

$$\frac{d\pi_i}{d\tau} = r_i \frac{\Delta G_i}{p_b}, \quad i = \overline{1, n_V}. \quad (17)$$

Относительные значения переменных состояния турбины при номинальном режиме приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Относительные значения

Параметр	Величина	Параметр	Величина
$\pi_{01}$	1.0000	$\pi_{02}$	0.9730
$\pi_{03}$	0.4763	$\pi_{04}$	0.3062
$\pi_{05}$	0.1967	$\pi_{06}$	0.1917
$\pi_{07}$	0.1868	$\pi_{08}$	0.1830
$\pi_{09}$	0.1028	$\pi_{010}$	0.055
$\pi_{011}$	0.0151	$\pi_{012}$	0.0038
$\pi'_1$	0.9933	$\pi'_3$	0.4500
$\pi'_4$	0.2732	$\pi'_5$	0.1933
$\pi'_7$	0.185	$\pi'_9$	0.0957
$\pi'_{10}$	0.0507	$\pi'_{11}$	0.0137
$\pi'_{12}$	0.0035	–	–

На основании (11) определим параметры расходов для четырех РК и шести РЗ:

$$G_v = 4F_v \chi \sqrt{\frac{p_b}{v_{01}}}, \quad G_f = 6F_f \chi \sqrt{\frac{p_b}{v_{07}}},$$

где  $\chi = 0,6482$ ;  $F_v$  и  $F_f$  – площади сечений РК и РЗ. По формуле (7) определим функцию

$$\beta(\varepsilon) = \begin{cases} 1, & \varepsilon \leq \varepsilon_c, \\ \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{1 - \varepsilon_c}\right)^2}, & \varepsilon > \varepsilon_c. \end{cases}$$

В соответствии с (11) сформируем функции расходов РК и РЗ:

$$\varphi_v(\mu_1, \varepsilon) = \mu_v(\mu_1, \varepsilon)\beta(\varepsilon), \quad \varphi_f(\mu_2, \varepsilon) = \mu_f(\mu_2, \varepsilon)\beta(\varepsilon),$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – относительные координаты сервомоторов РК и РЗ. Графики экспериментальных функций расходов РК и РЗ приведены на рис. 1 и 2.

Введём относительные переменные частоты вращения ротора  $\varphi = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ , мощности турбины  $\nu = N/N_0$  и электрического генератора

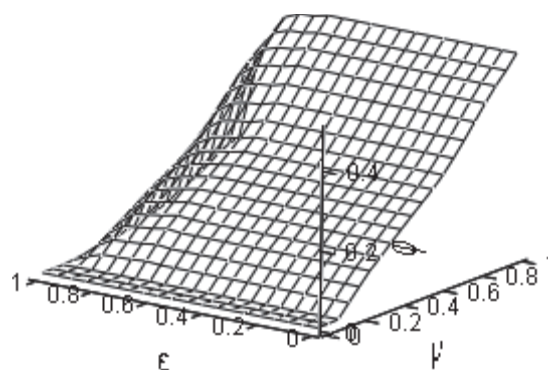


Рис. 1 – Функция расхода РК

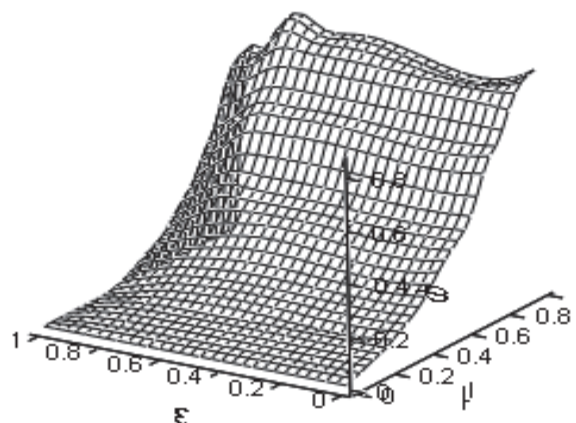


Рис. 2 – Функция расхода РЗ

$v_s = N_s/N_0$ . Определим безразмерные постоянные параметры:

$$\alpha_i = \frac{r_i G_{0i-1}}{\sqrt{p_{0i-1}^2 - p_{0i}^2}}, \quad i = \overline{1, 3, 7, 9, 12},$$

$$\alpha_2 = \frac{r_2 G_v}{\sqrt{p_{01} p_b}}, \quad \alpha_8 = \frac{r_8 G_v}{\sqrt{p_{07} p_b}},$$

$$\beta_1 = \frac{r_1 G_v}{\sqrt{p_{01} p_b}}, \quad \beta_7 = \frac{r_7 G_v}{\sqrt{p_{07} p_b}},$$

$$\beta_i = \frac{r_i G_{0i}}{\sqrt{p_{0i}^2 - p_{0i+1}^2}}, \quad i = \overline{2, 6, 8, 12},$$

$$\gamma_i = \frac{r_i G'_{0i}}{\sqrt{(p_{0i} - p'_{0i}) p_{0i}}}, \quad i = \overline{1, 3, 5, 7, 9, 12},$$

$$\delta_i = \frac{r_i G''_{0i}}{p_b}, \quad i = \overline{1, 5, 7},$$

$$\kappa_i = \frac{N_{0i} p_b}{N_0 \sqrt{p_{0i}^2 - p_{0i+1}^2}}, \quad i = \overline{2, 4, 8, 12},$$

$$\alpha_\varphi = \frac{N_0 t_b}{J \omega_0^2}, \quad \nu_l = \frac{N_l}{N_0}.$$

Значения параметров модели, вычисленные по конструктивным и технологическим параметрам турбины К-1000-60/1500-2, приведены в табл. 2.

Введем безразмерные функции:

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} 0, & x \leq y; \\ \sqrt{x^2 - y^2}, & x > y; \end{cases}$$

$$\sigma_1(x, y) = \begin{cases} 0, & x \leq y; \\ \sqrt{(x - y)x}, & x > y. \end{cases}$$

$$\frac{d\pi_6}{d\tau} = \alpha_6\sigma(\pi_5, \pi_6) - \beta_6\sigma(\pi_6, \pi_7),$$

$$\frac{d\pi_7}{d\tau} = \alpha_7\sigma(\pi_6, \pi_7) - \beta_7\varphi_f\left(\mu_2, \frac{\pi_8}{\pi_7}\right)\sqrt{\pi_7} - \gamma_7\sigma_1(\pi_7, \pi_7') - \delta_7,$$

Таблица 2 – Постоянные параметры модели

Параметр	Величина	Параметр	Величина
$\pi_0$	1.0833	$\pi_k$	0.0007
$\alpha_1$	0.6756	$\beta_1$	1.0323
$\alpha_2$	25.0002	$\beta_2$	7.6732
$\alpha_3$	4.6606	$\beta_3$	9.7817
$\alpha_4$	12.8363	$\beta_4$	18.454
$\alpha_5$	0.6346	$\beta_5$	3.3244
$\alpha_6$	3.1463	$\beta_6$	3.2414
$\alpha_7$	6.2511	$\beta_7$	5.5666
$\alpha_8$	11.8747	$\beta_8$	3.2639
$\alpha_9$	5.1925	$\beta_9$	8.6288
$\alpha_{10}$	3.8682	$\beta_{10}$	5.9048
$\alpha_{11}$	3.1856	$\beta_{11}$	10.8854
$\alpha_{12}$	0.4346	$\beta_{12}$	1.5918
$\gamma_1$	0.1520	$\gamma_3$	3.4355
$\gamma_4$	3.5199	$\gamma_5$	0.0898
$\gamma_7$	0.2858	$\gamma_9$	1.3356
$\gamma_{10}$	1.5393	$\gamma_{11}$	2.1549
$\gamma_{12}$	0.2823	$\delta_1$	0.0003
$\delta_5$	0.0001	$\delta_7$	0.0305
$\kappa_2$	0.2037	$\kappa_3$	0.2463
$\kappa_4$	0.3347	$\kappa_8$	0.7826
$\kappa_9$	1.2237	$\kappa_{10}$	3.4108
$\kappa_{11}$	10.4487	$\kappa_{12}$	31.4369
$\alpha_\varphi$	0.0705	$v_l$	0.0174

$$\frac{d\pi_8}{d\tau} = \alpha_8\varphi_f\left(\mu_2, \frac{\pi_8}{\pi_7}\right)\sqrt{\pi_7} - \beta_8\sigma(\pi_8, \pi_9),$$

$$\frac{d\pi_9}{d\tau} = \alpha_9\sigma(\pi_8, \pi_9) - \beta_9\sigma(\pi_9, \pi_{10}) - \gamma_9\sigma_1(\pi_9, \pi_9'),$$

$$\frac{d\pi_{10}}{d\tau} = \alpha_{10}\sigma(\pi_9, \pi_{10}) - \beta_{10}\sigma(\pi_{10}, \pi_{11}) - \gamma_{10}\sigma_1(\pi_{10}, \pi_{10}'),$$

$$\frac{d\pi_{11}}{d\tau} = \alpha_{11}\sigma(\pi_{10}, \pi_{11}) - \beta_{11}\sigma(\pi_{11}, \pi_{12}) - \gamma_{11}\sigma_1(\pi_{11}, \pi_{11}'),$$

$$\frac{d\pi_{12}}{d\tau} = \alpha_{12}\sigma(\pi_{11}, \pi_{12}) - \beta_{12}\sigma(\pi_{12}, \pi_k) - \gamma_{12}\sigma_1(\pi_{12}, \pi_{12}'),$$

$$\frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{\alpha_\varphi}{(1 + \varphi)} \left( \sum_{i \in I_N} \kappa_i \sigma(\pi_i, \pi_{i+1}) - v_l - v_s \right).$$

Здесь  $I_N = \{2, 4, 8, 12\}$ . Входными переменными этой модели являются координаты сервомоторов РК и РЗ  $\mu_1 = \mu_1(\tau)$  и  $\mu_2 = \mu_2(\tau)$  соответственно, а также мощность электрического генератора  $v_s$ . Давления в отборах полагаем постоянными и равными их значениям в номинальном режиме. Обозначая вектор состояния и векторную функцию правых частей приведенной СДУ через  $\mathbf{X} = (\pi_1 \ \pi_2 \ \dots \ \pi_{12} \ \varphi)$  и  $\mathbf{f}_i(\mathbf{X}, \mu_1, \mu_2, v_s)$ , модель турбины представим в векторном виде:

$$d\mathbf{X}/d\tau = \mathbf{f}_i(\mathbf{X}, \mu_1, \mu_2, v_s). \quad (18)$$

Эта модель позволяет исследовать процессы при изменении режимов работы турбины.

### Исследование режима сброса нагрузки

Для исследования режима сброса нагрузки с помощью модели (18) зададим для нее соответствующие номинальному режиму начальное условие  $\mathbf{X}_0 = (\pi_{01} \ \pi_{02} \ \dots \ \pi_{012} \ 0)$ , мощность электрического генератора при сбросе нагрузки  $v_s = 0$ , функции перемещения сервомоторов РК и РЗ, представленные на рис. 3.

На рис. 4–6 показаны графики переменных давления, полученные численным интегрированием СДУ (18). На рис. 7 дан график изменения относительной переменной частоты в процентах  $y = 100\varphi$ .

Переменная давления в первом объеме ЦВД на рис. 4 незначительно увеличивается, а в остальных объемах переменные давления понижаются. Переменные давлений в СПП на рис. 5 сначала сближаются, а затем почти одинаково начинают снижаться. Переменные давлений в ЦНД на рис. 6 понижаются.

После преобразования правых частей СДУ (17) и ДУ (15) получим нелинейную модель паровой турбины К-1000-60/1500-2 в виде СДУ в относительных переменных состояниях:

$$\frac{d\pi_1}{d\tau} = \alpha_1\sigma(\pi_0, \pi_1) - \beta_1\varphi_v\left(\mu_1, \frac{\pi_2}{\pi_1}\right)\sqrt{\pi_1} - \gamma_1\sigma_1(\pi_1, \pi_1') - \delta_1,$$

$$\frac{d\pi_2}{d\tau} = \alpha_2\varphi_v\left(\mu_1, \frac{\pi_2}{\pi_1}\right)\sqrt{\pi_1} - \beta_2\sigma(\pi_2, \pi_3),$$

$$\frac{d\pi_3}{d\tau} = \alpha_3\sigma(\pi_2, \pi_3) - \beta_3\sigma(\pi_3, \pi_4) - \gamma_3\sigma_1(\pi_3, \pi_3'),$$

$$\frac{d\pi_4}{d\tau} = \alpha_4\sigma(\pi_3, \pi_4) - \beta_4\sigma(\pi_4, \pi_5) - \gamma_4\sigma_1(\pi_4, \pi_4'),$$

$$\frac{d\pi_5}{d\tau} = \alpha_5\sigma(\pi_4, \pi_5) - \beta_5\sigma(\pi_5, \pi_6) - \gamma_5\sigma_1(\pi_5, \pi_5') - \delta_5,$$

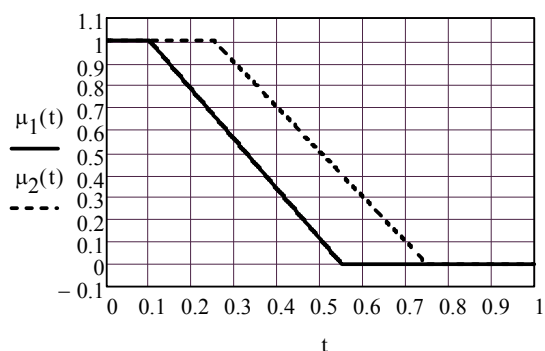


Рис. 3 – Функции перемещения сервомоторов

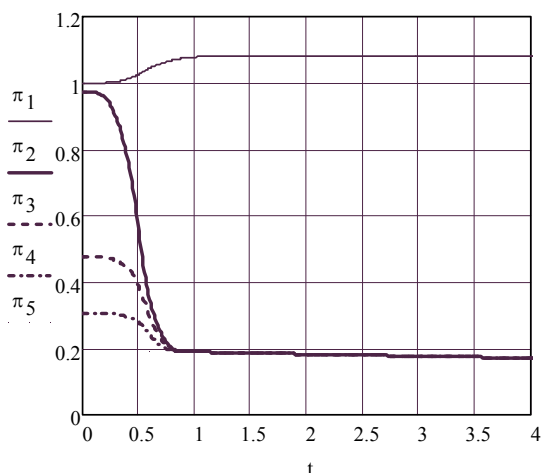


Рис. 4 – Изменение давлений в ЦВД

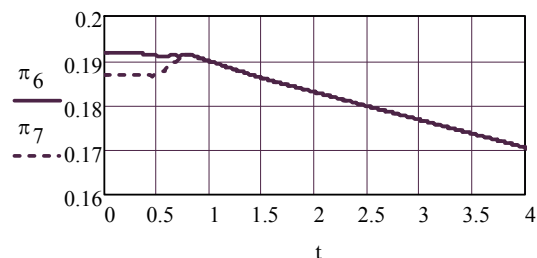


Рис. 5 – Изменение давлений в СПП

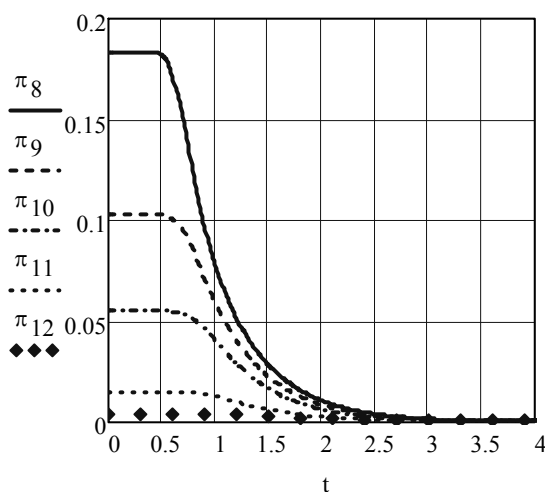


Рис. 6 – Изменение давлений в ЦНД

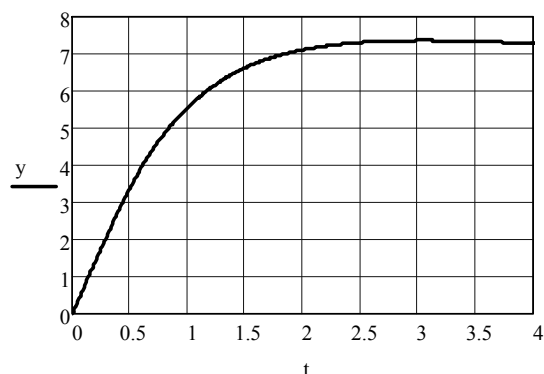


Рис. 7 – Изменение частоты

На рис. 7 переменная частоты вращения ротора турбины  $y$  плавно увеличивается в течение 3 с до своего максимального значения, а затем медленно начинает снижаться. Максимальный заброс оборотов частоты турбины К-1000-60/1500-2 составил 7,36 % от номинального значения частоты.

### Выводы

Приведены уравнения динамики паровой турбины как объекта управления в абсолютных переменных. Преобразованием этих уравнений построена модель турбины К-1000-60/1500-2 в относительных переменных состояния, учитывающая экспериментальные данные регулирующих органов и использующая минимальное количество вычислений. На основании этой модели для исследования режима сброса нагрузки построены графики изменения переменных давления и частоты. Модель паровой турбины К-1000-60/1500-2 в относительных переменных используется для исследования системы автоматического управления турбиной.

### Список литературы

- 1 **Кириллов, И. И.** Автоматическое регулирование паровых турбин и газотурбинных установок / **И. И. Кириллов.** – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 447 с.
- 2 **Самойлович, Г. С.** Переменные и переходные режимы в паровых турбинах / **Г. С. Самойлович, Б. М. Трояновский.** – Москва : Энергоиздат, 1982. – 496 с.
- 3 **Швецов, В. Л.** Результаты анализа динамических характеристик турбины К-1100-60/1500-2М при импульсных разгрузках по командам противоаварийной автоматики электрических сетей / **В. Л. Швецов, И. Н. Бабаев** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – № 8. – С. 50–58. – Бібліогр. : 2 назв. – ISSN 2078-774X.
- 4 **Северин, В. П.** Нелинейные модели переходных режимов паровых турбин АЭС для оптимизации процессов управления / **В. П. Северин,**

**Е. Н. Никулина, И. Х. Чеченова** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 8(1180). – С. 65–71. – Бібліогр. : 5 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.09.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Kirilov, I. I.** (1988), *Avtomaticheskoe regulirovanie parovyh turbin i gazoturbinyh ustanovok [Automatic control of steam turbines and gas turbines]*, Mashinostroenie, Leningrad, Russia.
- 2 **Samoylovich, G. S. and Troyanovskiy, B. M.** (1982), *Peremennye i perehodnye rezhimy v parovyh turbinah [Variables and transients modes in steam turbines]*, Energoizdat, Moscow, Russia.

- 3 **Shvetsov, V. L. and Babaev, I. N.** (2012), "Rezultaty analiza dinamicheskikh karakteristik turbiny K-1100-60/1500-2M pri impul'snyh razgruzkah po komandam protivoavariynoy avtomatiki elektricheskikh setey [Results of Analysis of Dynamic Characteristics of Turbine K-1100-60/1500-2M Under Impulse Unloadings on Command of the Emergency Control Automatics of the Electrical Networks]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8, pp. 50–58.
- 4 **Severin, V., Nikulina, E. and Chechenova, I.** (2016), "Nonlinear models of transients of nuclear power steam turbines to optimize control processes", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1180), pp. 65–71, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.08.09.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Северин Валерий Петрович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; e-mail: severinvp@gmail.com.

**Severin Valeriy Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Systems Analysis and Information Analytical Technologies of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

**Никулина Елена Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: elena78\_02@inbox.ua.

**Nikulina Elena Nikolaevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Radioelectronics of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

**Шевцов Александр Сергеевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; e-mail: sandrik877@gmail.com.

**Shevtsov Alexander Sergeevich** – aspirant of Department of Systems Analysis and Information Analytical Technologies of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Северин, В. П.** Модель паровой турбины K-1000-60/1500-2 для исследования процессов управления / **В. П. Северин, Е. Н. Никулина, А. С. Шевцов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 57–62. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.08.

*Please cite this article as:*

**Severin, V., Nikulina, E. and Shevtsov, O.** (2017), "Model of Steam Turbine K-1000-60/1500-2 for Control Processes Research", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 8(1230), pp. 57–62, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.08.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Северин, В. П.** Модель парової турбіни K-1000-60/1500-2 для дослідження процесів керування / **В. П. Северин, О. М. Нікуліна, О. С. Шевцов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 8(1230). – С. 57–62 – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2017.08.08.

**АНОТАЦІЯ** Розглянуті рівняння перехідних режимів парової турбіни. Шляхом перетворення рівнянь турбіни побудована нелінійна модель парової турбіни K-1000-60/1500-2 як об'єкта автоматичного керування в відносних змінних стану, що враховує експериментальні дані регулюючих органів і використовує мінімальну кількість обчислень. На основі цієї моделі для дослідження режиму скидання навантаження побудовані графіки зміни змінних тиску та частоти.

**Ключові слова:** парова турбіна, об'єкт керування, рівняння динаміки, нелінійна модель, перехідний режим.

Поступила (received) 08.02.2017