

УДК 621.313.12.001.57

А.Н. Бундюк, канд. техн. наук, доц.,  
Е.О. Улицкая, канд. техн. наук,  
О.С. Ларионова, инженер,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОГО ТРАКТА КОГЕНЕРАЦИОННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

**Введение.** Когенерационные технологии относятся к инновационным энергосберегающим технологиям, которые позволяют повысить эффективность использования традиционного вида топлива при производстве электроэнергии, уменьшить затраты на строительство мощных линий электропередач благодаря распределенному размещению децентрализованных источников энергии, а также существенно уменьшить потери электроэнергии при транспортировке и снизить выбросы парниковых газов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Расчеты технико-экономических показателей когенерационных энергетических установок (КЭУ) подтверждают их высокую экономичность [1]. Для значительного количества потребителей энергетической продукции наиболее привлекательными являются КЭУ с тепловыми двигателями в виде двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Вопросам изучения энергетических характеристик КЭУ посвящено достаточное количество научных публикаций [2...5]. Однако динамика топливно-воздушного тракта (ТВТ) и выбор системы регулирования частоты генерируемой электроэнергии изучены не в полном объеме. Таким образом, исследование динамических свойств энергогенерирующей компоненты КЭУ является актуальным.

**Целью работы** является разработка математической модели топливно-воздушного тракта и формирование системы регулирования частоты генерируемой электроэнергии когенерационной энергетической установки.

**Изложение основного материала.** Рассматривается топливно-воздушный тракт КЭУ как объект регулирования частоты вращения дизель-генераторного вала (рис. 1).

Топливо-воздушный тракт КЭУ объединяет три вида аккумуляторов энергии: материальные, механические и тепловые.

К материальным аккумуляторам относятся емкости: смесителя (См), компрессора (К), турбины (Т), насоса (Н), насоса водяного (НВ), насоса масляного (НМ), двигателя внутреннего сгорания (ДВС), теплоутилизатора (ТУ), всех теплообменников (ТО) и соединяющих их трубопроводов.

К механическим аккумуляторам относятся вращающиеся массы дизель-генераторного (Г) и турбо-компрессорного валов.

К тепловым аккумуляторам относятся теплообменники. На схеме это топливно-водяной теплообменник (ТВ ТО), водо-водяной теплообменник (ВВ ТО), водо-масляный теплообменник (ВМ ТО), газо-водяной тепло-утилизатор (ТУ).

При составлении уравнений динамики аккумуляторов КЭУ предполагается, что емкости с рабочим телом являются объектами с сосредоточенными параметрами, а давление и температу-

DOI 10.15276/opus.2.44.2014.23

© А.Н. Бундюк, Е.О. Улицкая, О.С. Ларионова, 2014

ра в установившемся состоянии равны средним из значений как давления, так и температуры рабочего тела на входе и выходе объектов (рис. 1).

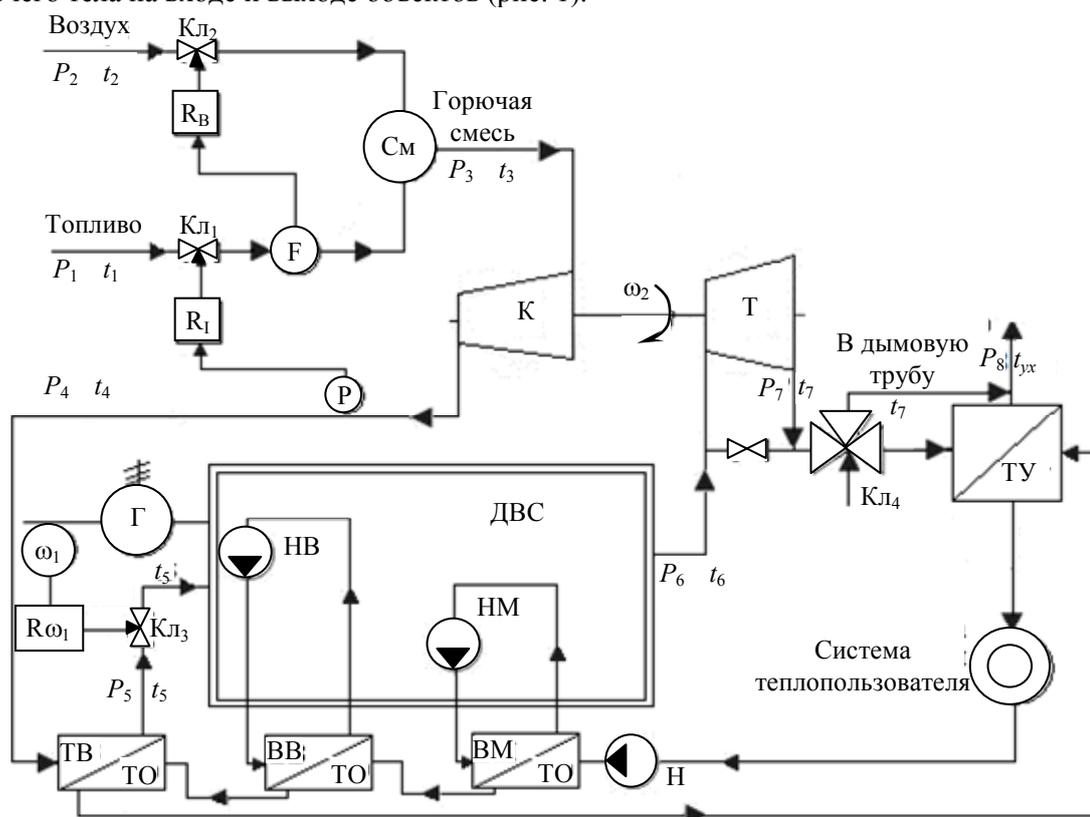


Рис. 1. Схема автоматизированной системы регулирования топливно-воздушного тракта КЭУ:  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8$  — соответственно давления топлива, воздуха, топливно-воздушной смеси до и после компрессора, на входе в ДВС, давление выхлопных газов на выходе ДВС, на выходе турбины, давление дымовых газов, уходящих в дымовую трубу;  $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_{yx}$  — соответственно температуры топлива, воздуха, топливно-воздушной смеси до и после компрессора, на входе в ДВС, температура выхлопных газов на выходе ДВС, на выходе турбины, температура выхлопных газов, уходящих в дымовую трубу;  $Кл_1, Кл_2, Кл_3, Кл_4$  — клапаны подачи топлива, воздуха, топливно-воздушной смеси и дымовых газов соответственно;  $R_m, R_v, R_{\omega_1}$  — регуляторы топлива, воздуха, частоты оборотов двигателя соответственно;  $\omega_1, \omega_2$  — частоты вращения вала двигателя и турбокомпрессорного вала соответственно

Уравнения материальных аккумуляторов это совокупность уравнений для участков:

- топливно-воздушного тракта между клапанами подачи топлива ( $Кл_1$ ) и воздуха ( $Кл_2$ ) и компрессором;
- топливно-воздушного тракта между компрессором и клапаном подачи горючей смеси в ДВС ( $Кл_3$ );
- между клапаном  $Кл_3$  и турбиной;
- между турбиной и клапаном  $Кл_4$ .

Указанные материальные аккумуляторы КЭУ описываются системой дифференциальных уравнений первого порядка без запаздывания

$$A \frac{d(\Delta P_3)}{dt} + \Delta P_3 = a_1 \Delta P_1 + a_2 \Delta m_1 + a_3 \Delta P_2 + a_4 \Delta m_2 - a_5 \Delta P_5 - a_6 \Delta \omega_2,$$

$$B \frac{d(\Delta P_5)}{dt} + \Delta P_5 = b_1 \Delta P_3 + b_2 \Delta \omega_2 - b_3 \Delta P_{\text{ВПП}} - b_4 \Delta m_3,$$

$$C \frac{d(\Delta P_6)}{dt} + \Delta P_6 = c_1 \Delta P_{\text{ВВР}} + c_2 \Delta m_3 - c_3 \Delta P_7 - c_4 \Delta t_6,$$

$$J \frac{d(\Delta P_7)}{dt} + \Delta P_7 = j_1 \Delta P_6 + j_2 \Delta t_6 + j_3 \Delta P_{\text{ТУ}} + j_4 \Delta m_4,$$

где  $A, B, C, J$  — постоянные времени;

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$  — коэффициенты передачи по каналу давления топливно-воздушной смеси;

$b_1, b_2, b_3, b_4$  — коэффициенты передачи по каналу давления топливно-воздушной смеси после ТВ ТО;

$c_1, c_2, c_3, c_4$  — коэффициенты передачи по каналу давления дымовых газов после ДВС;

$j_1, j_2, j_3, j_4$  — коэффициенты передачи по каналу давления дымовых газов после турбины;

$\Delta m_1, \Delta m_2, \Delta m_3, \Delta m_4$  — перемещения регулирующих органов клапанов подачи топлива, воздуха, топливно-воздушной смеси и дымовых газов соответственно;

$\Delta P_{\text{ВВР}}, \Delta P_{\text{ТУ}}$  — приращения давления впрыска топливно-воздушной смеси в ДВС и давления дымовых газов на входе в ТУ.

Уравнения турбокомпрессорного нагнетателя. Адиабатическое сжатие рабочего тела в компрессоре определяет его выходную температуру

$$T_4 = T_3 \left( \frac{1}{\eta_k} \left[ \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^n - 1 \right] + 1 \right), \quad (1)$$

откуда

$$T_4 = f(T_3, P_3, P_4),$$

где  $T_3, T_4$  — абсолютные температуры топливно-воздушной смеси до и после компрессора соответственно;

$P_3, P_4$  — давления топливно-воздушной смеси до и после компрессора соответственно;

$n=1,4$ ;

$\eta_k$  — КПД компрессора.

После разложения (1) в ряд Тейлора по степеням независимых переменных

$$\Delta T_4 = \frac{dT_4}{dT_3} \Delta T_3 + \frac{dT_4}{dP_3} \Delta P_3 + \frac{dT_4}{dP_4} \Delta P_4.$$

Адиабатическое расширение газа в турбине определяет выходную температуру

$$T_7 = T_6 \left( 1 - \eta_T \left[ 1 - \left( \frac{P_7}{P_6} \right)^n \right] \right), \quad (2)$$

откуда

$$T_7 = f(T_6, P_6, P_7),$$

где  $T_6, T_7$  — абсолютные температуры дымовых газов до и после турбины соответственно;

$P_6, P_7$  — давления выхлопных газов на выходе ДВС и на выходе турбины соответственно;

$\eta_T$  — КПД турбины.

После разложения (2) в ряд Тейлора по степеням независимых переменных

$$\Delta T_7 = \frac{dT_7}{dT_6} \Delta T_6 + \frac{dT_7}{dP_6} \Delta P_6 + \frac{dT_7}{dP_7} \Delta P_7.$$

Уравнения тепловых аккумуляторов КЭУ рассмотрены в [3].

Уравнения холодильника ТВ ТО [3]

$$E \frac{d(\Delta t_5)}{dt} + \Delta t_5 = e_1 \Delta t_4 - e_2 \Delta t_{\text{СТ}},$$

$$D \frac{d(\Delta t_{\text{СТ}})}{dt} + t_{\text{СТ}} = d_1 t_4 + d_2 t_5 + d_3 t_{\text{ВХ}},$$

где  $E, D$  — постоянные времени;

$e_1, e_2$  — коэффициенты передачи по каналу изменения температуры топливно-воздушной смеси на выходе ТВ ТО;

$t_{CT}$  — температура стенки ТВ ТО;

$t_4, t_5$  — температуры топливно-воздушной смеси после компрессора и на входе в ДВС соответственно;

$d_1, d_2, d_3$  — коэффициенты передачи по каналу изменения температуры стенки ТВ ТО.

Уравнения динамики механических аккумуляторов это совокупность уравнений динамики:

— турбокомпрессорного вала;

— дизель-генераторного вала.

Уравнения механических аккумуляторов

$$H \frac{d(\Delta\omega_2)}{dt} + \Delta\omega_2 = h_1\Delta P_6 - h_2\Delta P_7 + h_3\Delta t_6 + h_4\Delta P_3 + h_5\Delta P_5 - h_6\Delta t_3,$$

$$T \frac{d(\Delta\omega_1)}{dt} + \Delta\omega_1 = k_1\Delta m_1 + k_2\Delta Q_H^P - k_3\Delta N_{Г},$$

где  $H, T$  — постоянные времени;

$h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$  — коэффициенты передачи по каналу частоты вращения турбокомпрессорного вала;

$k_1, k_2, k_3$  — коэффициенты передачи по каналу частоты вращения дизель-генераторного вала;

$\Delta\omega_1, \Delta\omega_2$  — приращения частот вращения вала двигателя и турбокомпрессорного вала соответственно;

$\Delta t_3, \Delta t_6$  — приращения температур топливно-воздушной смеси до компрессора и выхлопных газов на выходе ДВС соответственно;

$\Delta P_6, \Delta P_7, \Delta P_3, \Delta P_5$  — приращения давлений выхлопных газов на выходе ДВС, на выходе турбины, топливно-воздушной смеси до компрессора и на входе в ДВС соответственно;

$\Delta m_1$  — перемещение регулирующих органов клапанов подачи топлива;

$\Delta Q_H^P$  — приращение нижней рабочей теплоты сгорания топлива;

$\Delta N_{Г}$  — приращение электрической мощности генератора.

**Результаты.** На базе математической модели построена электронная модель топливно-воздушного тракта в пакете MATLAB. С помощью электронной модели проведен анализ динамических свойств топливно-воздушного тракта КЭУ.

Изменение входного давления газа и воздуха приводит к изменению давления в разных точках ТВТ (рис. 2). Однако, это изменение существенно не влияет на частоту вращения дизель-генераторного вала ДВС.

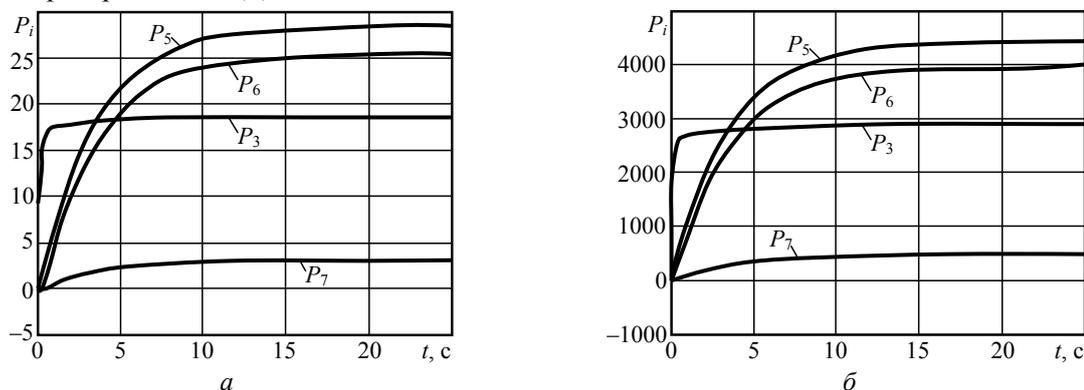


Рис. 2. Кривые разгона при возмущении: +10 %  $P_1$  (а), +10 %  $P_2$  (б)

Открытие клапана подачи горючей смеси Кл3 приводит к повышению частоты вращения вала дизель-генератора (рис. 3, а) и снижению давления в ТВТ (рис. 3, б).

При снижении теплоты сгорания топлива  $Q_p^C$  в горючей смеси частота вращения дизель-генераторного вала  $\omega_1$  значительно снижается (рис. 4, а).

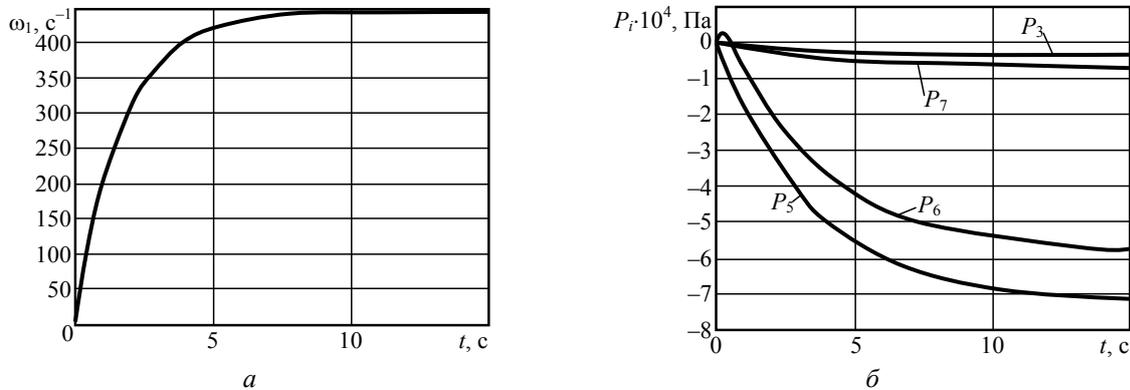


Рис. 3. Кривые разгона при возмущении  $+10\% m_3$ : частота вращения  $\omega_1$  (а), давление в ТВТ (б)

Повышение нагрузки генератора приводит к снижению частоты вращения дизель-генераторного вала  $\omega_1$ , но в большей степени, чем в предыдущем случае (рис.4, б).

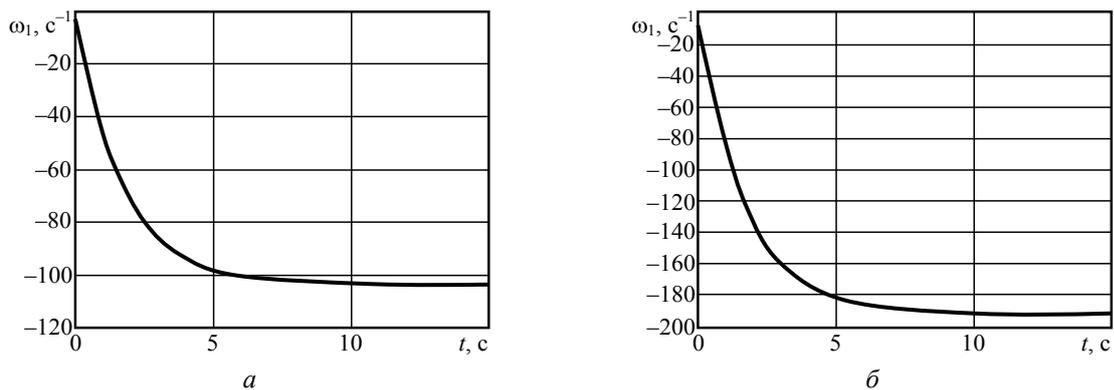


Рис. 4. Кривые разгона при возмущении:  $-10\% Q_p^C$  (а),  $+10\% N_\Gamma$  (б)

Анализ разгонных характеристик показывает, что наиболее мощным воздействием на частоту вращения дизель-генераторного вала является перемещение клапана подачи горючей смеси в ДВС. Потому перемещение штока  $m_3$  клапана Кл3 выбрано в качестве управляющего воздействия регулятора  $R\omega_1$  при внешних возмущениях на частоту вращения дизель-генераторного вала. Изменение положения регулирующего клапана Кл3 приводит к изменению давления горючей смеси после компрессора, что изменяет расход топлива через клапан Кл1 и расход воздуха через клапан Кл2. Расход топлива обеспечивает регулятор топлива  $R_t$ , а соответствующий расход воздуха — регулятор воздуха  $R_v$ . Переходные процессы в автоматизированной системе регулирования при разных возмущениях представлены ниже.

При повышении  $Q_p^C$  на  $10\%$  частота вращения  $\omega_1$  увеличивается на  $7,5\text{ c}^{-1}$  (рис. 5, а). При этом давление в ТВТ изменяется незначительно (рис. 5, б).

Повышение нагрузки генератора на  $10\%$  приводит к снижению частоты вращения дизель-генераторного вала на  $4,2\text{ c}^{-1}$  (рис. 6, а). Давление перед компрессором возрастает до  $10\text{ кПа}$  (рис. 6, б). В остальных точках ТВТ изменения давлений незначительные.

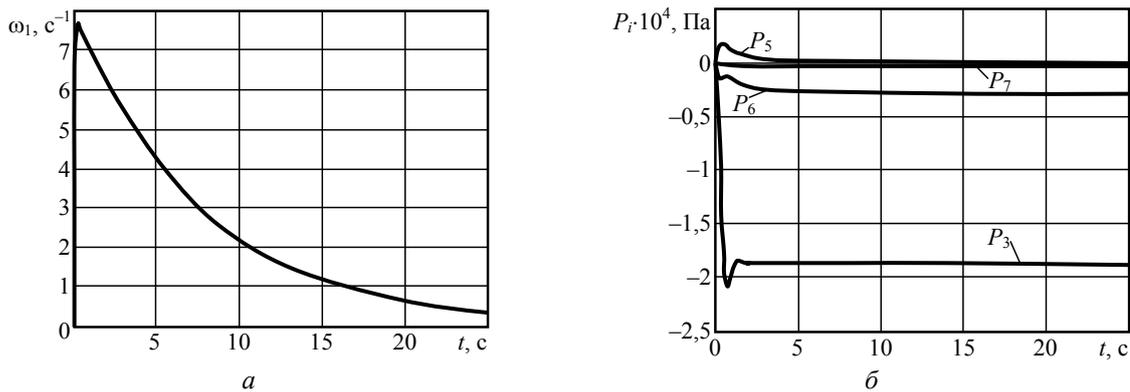


Рис. 5. Переходные процессы в автоматизированной системе регулирования ТВТ при увеличении  $Q_p^C$  на 10 %: частота вращения дизель-генераторного вала (а), давление в точках ТВТ (б)

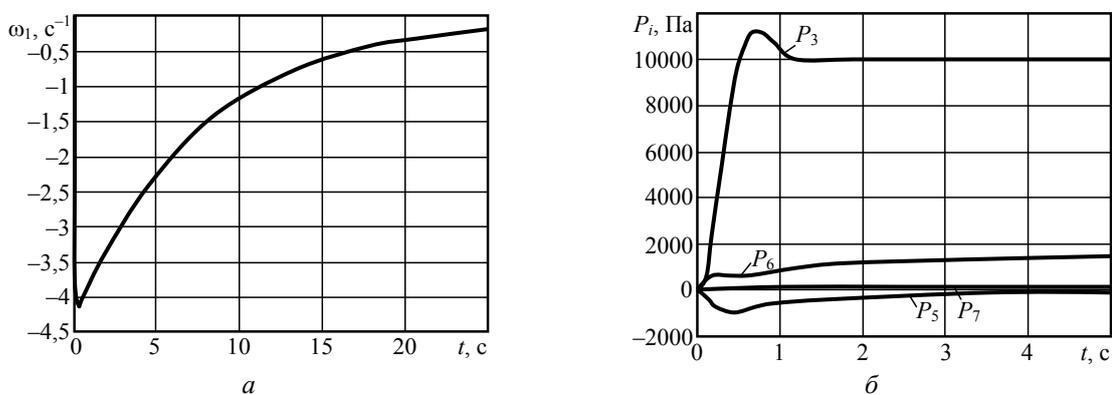


Рис. 6. Переходные процессы в автоматизированной системе регулирования ТВТ при увеличении  $N_T$  на 10 %: частота вращения дизель-генераторного вала (а), давление в точках ТВТ (б)

Влияние входных давлений газа  $P_1$  и воздуха  $P_2$  на давление в точках ТВТ показано на рис. 7. Повышение  $P_1$  приводит к возрастанию  $P_3$  на 10 Па, а повышение  $P_2$  — к возрастанию  $P_3$  на 5000 Па. В остальных точках давление изменяется незначительно.

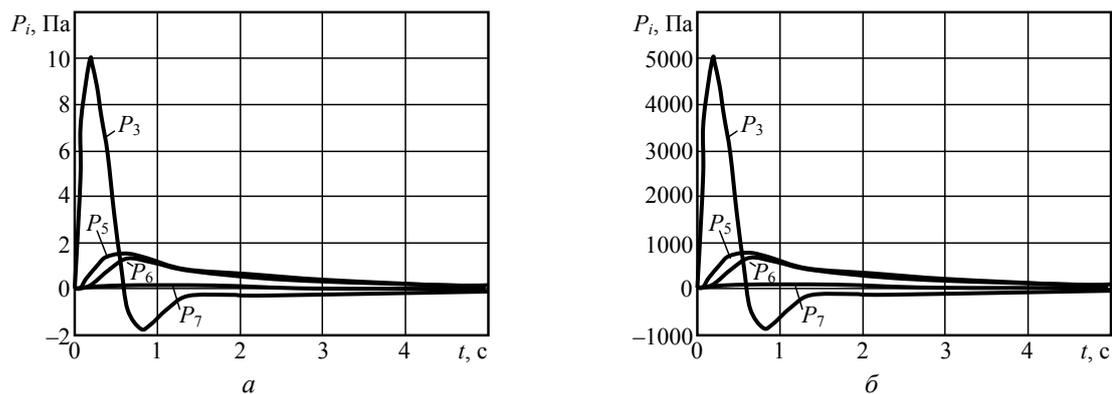


Рис. 7. Переходные процессы в автоматизированной системе регулирования ТВТ при увеличении на 10 %: давления воздуха  $P_1$  (а), давления газа  $P_2$  (б)

**Выводы.** Разработаны математическая и электронная модели топливно-воздушного тракта КЭУ. Электронная модель в пакете MATLAB позволила построить разгонные кривые при раз-

ных возмущениях и оценить динамические свойства топливно-воздушного тракта КЭУ как объекта регулирования частоты вращения дизель-генераторного вала.

На основе анализа свойств объекта и в соответствии с требованиями к качеству генерируемой электрической энергии предложена структура автоматизированной системы регулирования параметров ТВТ КЭУ. Переходные процессы показали возможность и целесообразность применения предложенной структуры для управления процессом генерации электроэнергии КЭУ. Предложенная структура управления обеспечивает устойчивые переходные процессы при разных внешних воздействиях.

### Литература

1. Бундюк, А.М. Розробка алгоритму для розрахунку статичної когенераційної енергетичної установки / А.М. Бундюк, О.О. Уліцька // Холодильна техніка і технологія. — 2013. — № 3(143). — С. 34 — 40.
2. Бундюк, А.Н. Выбор структуры АСР когенерационной энергетической установки / А.Н. Бундюк, Е.О. Улицкая // Сб. трудов МНПК “Новые технологии в автоматизированном управлении: теория и практика”, 12–15 сентября 2013, Одесса. — 2013. — С. 21 — 26.
3. Ларіонова, О.С. Моделювання динамічних характеристик контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки / О.С. Ларіонова // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — 2011. — Вип. 1(35). — С. 71 — 74.
4. Тодорцев, Ю.К. Математична модель контура теплопостачання когенераційної енергетичної установки / Ю.К. Тодорцев, О.С. Ларіонова, А.М. Бундюк // Автоматика. Автоматизація. Електротехнічні комплекси та системи. — 2009. — № 2(24). — С. 8 — 11.
5. Ларіонова, О.С. Математична модель динаміки когенераційної енергетичної установки / О.С. Ларіонова, А.М. Бундюк // Автоматика / Automatics — 2011: матеріали XVIII Міжнар. конф. з автоматичного управління, 28–30 вересня 2011 року, Львів. — Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2011. — С. 61 — 62.

### References

1. Bundyuk, A.M. and Ulitska, O.O. (2013). Development of algorithm for calculating the static of power installation cogeneration. *Refrigeration Engineering and Technology*, 3, 34-40.
2. Bundyuk, A.N. and Ulitskaya, E.O. (2013). Selection of ACS structure of the cogeneration energy plant. In *Proceedings of the Conference on New Technologies in Automated Management: Theory and Practice* (pp. 21-26). Odessa, Ukraine: Astroprint.
3. Larionova, O.S. (2011). Modeling cogeneration energy plant heating loop dynamic characteristics. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*, 1, 71-74.
4. Todorcev, Yu.K., Larionova, O.S. and Bundyuk, A.M. (2009). The mathematical model of contour of heating of cogeneration power plant. *Automatic. Automation. Electrical Engineerings Complexes and Systems*, 2, 8-11.
5. Larionova, O.S. and Bundyuk, A.M. (2011). Mathematical model of dynamics of cogeneration energy plant. In M. Kiselychuk (Ed.), *Proceedings of 18<sup>th</sup> International Conference on Automatic Control (Automatics — 2011)* (pp. 61-62). Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Pub. House.

### АНОТАЦІЯ / ANNOTATION / ABSTRACT

*А.М. Бундюк, О.О. Уліцька, О.С. Ларіонова. Моделювання динаміки паливно-повітряного тракту когенераційної енергетичної установки.* Використання когенераційних енергетичних установок є одним з перспективних напрямків розвитку малої енергетики України. Генерація теплової та електричної енергії на базі одного палива дозволяє збільшити загальний ККД установки. Це робить доцільним застосування когенераційних енергетичних установок у компактних житлових масивах, на відокремлених промислових підприємствах з житловим фондом для співробітників, у спортивних комплексах і т.д. Розглянуто паливно-повітряний тракт когенераційної енергетичної установки як об'єкт регулювання частоти обертів дизель-генераторного вала. На базі розробленої математичної моделі паливно-повітряного тракту проаналізовані динамічні характеристики когенераційних енергетичних установок у вигляді розгінних кривих, отриманих в середовищі пакету MathWorks MATLAB при різних зовнішніх збуреннях.

У відповідності з вимогами до технології генерації електричної енергії обрано тип перехідного процесу та закон регулювання частоти обертів дизель-генераторного валу.

*Ключові слова:* когенераційна енергетична установка, дизель-генератор, перехідний процес, закон регулювання, частота обертів валу.

*А.Н. Бундюк, Е.О. Улицкая, О.С. Ларионова. Моделирование динамики топливно-воздушного тракта когенерационной энергетической установки.* Использование когенерационных энергетических установок является одним из перспективных направлений развития малой энергетики Украины. Генерация тепловой и электрической энергии на основе одного вида топлива позволяет увеличить общий КПД установки. Это делает целесообразным применение когенерационных энергетических установок в компактных жилищных массивах, на обособленных промышленных предприятиях с жилищным фондом для сотрудников, в спортивных комплексах и т.д. Рассмотрен топливно-воздушный тракт когенерационной энергетической установки как объект регулирования частоты вращения дизель-генераторного вала. На базе разработанной математической модели топливно-воздушного тракта проанализированы динамические характеристики когенерационных энергетических установок в виде разгонных кривых, полученных в среде пакета MathWorks MATLAB при разных внешних возмущениях. В соответствии с требованиями к технологии генерации электрической энергии выбран тип переходного процесса и закон регулирования частоты вращения дизель-генераторного вала.

*Ключевые слова:* когенерационная энергетическая установка, дизель-генератор, переходной процесс, закон регулирования, частота вращения вала.

*A.N. Bundyuk, E.O. Ulitskaya, O.S. Larionova. Modelling the dynamics of the cogeneration power plant gas-air duct.* Introducing into wide practice the cogeneration power plants (or CHP) is one of promising directions of the Ukrainian small-scale power engineering development. Thermal and electric energy generation using the same fuel kind can increase the overall plant efficiency. That makes it appropriate to use CHPs at compact residential areas, isolated industrial enterprises constituting one complex with staff housing area, at sports complexes, etc. The gas-air duct of the cogeneration power plant has been considered as an object of the diesel-generator shaft velocity control. The developed GAD mathematical model, served to analyze the CHP dynamic characteristics as acceleration curves obtained under different external disturbances in the MathWorks MATLAB environment. According to the electric power generation technology requirements a convenient transition process type has been selected, with subsequent identification of the diesel-generator shaft rotation speed control law.

*Keywords:* cogeneration power plant, diesel-generator, transition process, control law, shaft rotary speed.

Рецензент д-р техн. наук., проф. Одес. нац. политехн. ун-та Баласанян Г.А.

Поступила в редакцию 18 сентября 2014 г.