

УДК 854.895.1

*АЛЕКСАНДРОВА АННА ФЕДОРОВНА, аспирант,**aleksandrova_anya@mail.ru**ЕМЕЛЬЯНОВ РЮРИК ТИМОФЕЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,**ert-44@yandex.ru**СМОЛЬНИКОВ ГЕННАДИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент,**macgasa@yandex.ru**ЦЫГАНКОВА АННА ВИКТОРОВНА, аспирант,**cygankova@krao.ru**Сибирский федеральный университет,**660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а*

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ГИДРОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Разработан и апробирован метод параметрического синтеза гидротранспортной системы теплоснабжения. Приведены основные результаты, полученные при его использовании. Проведенные имитационные исследования гидротранспортной системы теплоснабжения показали, что для обеспечения управления качеством и надежностью гидротранспортной системы требуется настройка и регулировка их параметров по отклонению от расчетных значений, вызванных нестабильностью протекающих процессов. Результаты, полученные при проведении исследований, могут быть использованы для автоматизации инженерных систем зданий в целях повышения их энергоэффективности.

Ключевые слова: синтез; гидротранспортная система; параметры; давление; регулятор; передаточные функции; трубопровод; переходная характеристика; напор.

*ANNA F. ALEKSANDROVA, Research Assistant,**aleksandrova_anya@mail.ru**RYURIK T. EMEL'YANOV, DSc, Professor,**ert-44@yandex.ru**GENNADII V. SMOL'NIKOV, PhD, A/Professor,**macgasa@yandex.ru**ANNA V. TSYGANKOVA, Research Assistant,**cygankova@krao.ru**Siberian Federal University,**79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia*

PARAMETRIC SYNTHESIS OF HYDROTRANSPORT HEAT-SUPPLY SYSTEM

The paper presents the development and testing of the parametric synthesis of hydrotransport heat-supply system. The simulation methods used for the investigation of this system show that the quality and safety control can be provided by setting and adjusting its parameters using the deviation of the estimated values caused by the instability of processes occurred. The obtained results can be used for automation of engineering systems of buildings with a view to improve their energy efficiency.

Keywords: synthesis; hydrotransport system; parameters; pressure; controller; transfer functions; pipeline; transient response; pressure.

Параметрический синтез систем является актуальной задачей теории и практики управления. Одним из способов управления качеством и надежностью гидротранспортной системы теплоснабжения являются настройка и регулировка их параметров. Настройка призвана скомпенсировать отклонения параметров гидротранспортной системы теплоснабжения от расчетных значений, вызванных нестабильностью протекающих процессов [1–4]. Несмотря на распространенность гидротранспортных систем теплоснабжения, аспекты их синтеза недостаточно разработаны. Поэтому выбор совокупности настроечных параметров и диапазонов их изменения является актуальным.

Задача параметрического синтеза настроечных параметров решается в вероятностной постановке. При этом считаются известными характеристики стохастических отклонений параметров от своих номинальных значений.

Целью научного исследования является оптимизация настроечных параметров контура регулирования давления в системе теплоснабжения.

Для выполнения параметрического синтеза параметров гидротранспортной системы теплоснабжения разработана структурная схема управления температурным режимом (рис. 1). Сигнал от датчика температуры поступает на регулятор, далее на объект регулирования (циркуляционный насос).

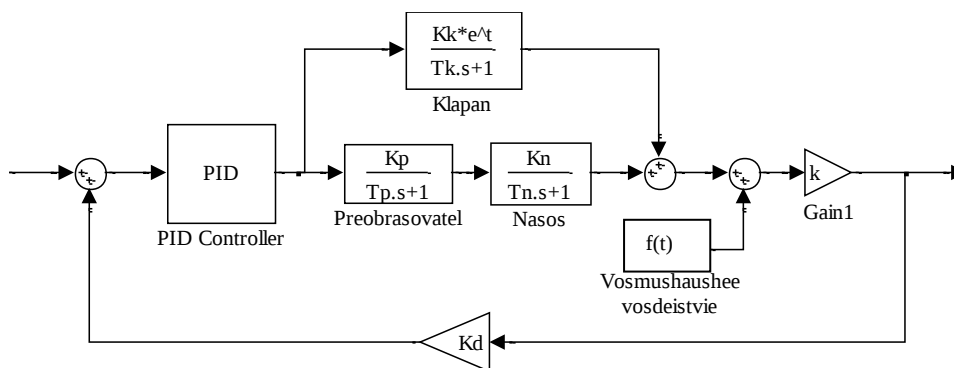


Рис. 1. Структурная схема синтеза настроечных параметров

Блоки Klapan, Preobrazovatel, Nasos образуют модель объекта управления. Блок Vosmushaushee vosdeistvie формирует сигнал внешнего возмущения. Задание формирует желаемое значение регулируемого параметра – температуры среды. Обратная связь с датчиком температуры K_d формирует сигнал о достигнутом значении регулируемой величины. Движущим сигналом системы является ошибка регулирования. Для корректировки регулируемого параметра по ошибке применен ПИД-регулятор. На выходе регулятора вырабатывается выходной (управляющий) сигнал $u(t)$, действие которого направлено на уменьшение рассогласования текущего значения контролируемой величины от заданного.

Передаточная функция идеального ПИД-регулятора

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}, \quad (1)$$

где s – преобразователь Лапласа; K_p, K_i, K_d – коэффициенты пропорциональности, интегрирования и дифференцирования соответственно.

Для синтеза настроечных параметров требуется настроить коэффициенты составляющих регулятора k_{Π} , $k_{\text{И}}$ и $k_{\text{Д}}$. Благодаря наличию интегральной и дифференциальной составляющей ПИД-регулятора при определённом соотношении коэффициентов k_{Π} , $k_{\text{И}}$ и $k_{\text{Д}}$ динамика в переходных процессах сглаживается [5–7]. Передаточные функции при нагрузке и разгрузке имеют одинаковую структуру, но различные постоянные времени. В связи с этим используемый регулятор должен иметь различные коэффициенты настроек в зависимости от знака изменения регулируемого параметра (температуры теплоносителя, давления в системе) и его производной, для того чтобы обеспечить оптимальные характеристики переходного процесса (время и перерегулирование).

Передаточная функция объекта регулирования запишется в виде

$$W_{\text{OP}}(p) = \frac{K \cdot e^{-\tau_{\text{BO}} \cdot p}}{T_{\text{BO}} \cdot p + 1}, \quad (2)$$

где K – коэффициент усиления объекта; τ – запаздывание на включение/отключение устройства; T_{BO} – постоянная времени; p – оператор.

Насос – инерционный механизм, постоянная времени которого T_N обусловлена временем прохождения жидкости из всасывающего патрубка в напорный [8–10], представляющий собой элементарный участок трубопровода. В связи с этим физические процессы в насосе и прилегающем трубопроводе можно описать RLC-контуром с передаточными функциями вида

$$W_{N_1}(p) = \frac{Q(p)}{H_N(p) - \Delta H_{\Sigma}(p)} = \frac{1}{T_{\Sigma} \cdot p + 1}; \quad (3)$$

$$W_{N_2}(p) = \frac{\Delta H_N(p)}{Q^2(p)} = R_{VN}(p);$$

$$W_{N_3}(p) = \frac{\Delta H(p)}{Q(p) - Q_{\text{OC}}(p)} = \frac{1}{T_e \cdot p}; \quad (4)$$

$$W_{N_4}(p) = \frac{Q_{\text{OC}}^2(p)}{\Delta H(p)} = R_{\Sigma}(p).$$

где $T_{\Sigma} = T_N + T_u$ – время прохождения жидкости через насос и прилегающий трубопровод, с; $T_N = 4(d_2 - d_1) / (\Omega z_p \ln(d_2 / d_1))$ – постоянная времени насоса, с; d_2, d_1 – входной и выходной диаметры круговой решетки центробежного насоса, м; Ω – относительная скорость жидкости в межлопаточном пространстве; z_p – число лопаток круговой решетки; T_u – инерционная постоянная времени трубопровода, с; T_e – емкостная постоянная времени трубопровода, с; $H_N(p) =$

$= H_0(p) \nu^2(p) - \Delta H_N(p) = H_0(p) - R_{VN} Q^2(p)$ – напор, развиваемый насосом, м;
 $\nu(p) = \frac{\omega_i(p)}{\omega_H(p)}$ – относительная частота вращения рабочего колеса насоса; $\omega_i(p)$,
 $\omega_H(p)$ – текущая и номинальная частоты вращения рабочего колеса насоса, с^{-1} ;
 $H_0(p)$ – напор насоса при нулевой производительности, м; $\Delta H_N(p)$ – потери
 напора в насосе, м; $Q(p)$ – производительность насосного комплекса (НК), $\text{м}^3/\text{с}$;
 R_{VN} – внутреннее сопротивление насоса, $\text{с}^2/\text{м}^5$; $\Delta H_\Sigma(p)$ – потери напора в гид-
 росистеме (в данном случае $\Delta H_\Sigma(p) = \Delta H(p)$), м; $\Delta H(p)$ – потери напора в при-
 легающем участке трубопровода, м; $R_{\Sigma}(p) = R_c(p) + R_{kav}(p)$ – гидродинамиче-
 ское сопротивление прилегающего участка трубопровода, $\text{с}^2/\text{м}^5$; $R_c(p)$ – соб-
 ственное гидродинамическое сопротивление участка трубопровода, $\text{с}^2/\text{м}^5$;
 $R_{kav}(p) = \frac{\zeta_{kav}(p)}{2gS^2} = K_{kav} \cdot V_{kav}(p)$ – гидродинамическое сопротивление, соответ-
 ствующее наличию кавитации в потоке жидкости, $\text{с}^2/\text{м}^5$; $V_{kav}(p)$ – объем кавита-
 ционной каверны, м^3 .

Для моделирования переходных процессов использовалась среда про-
 граммы MATLAB&Simulink. График переходного процесса для модели
 с аналоговым регулятором приведен на рис. 2.

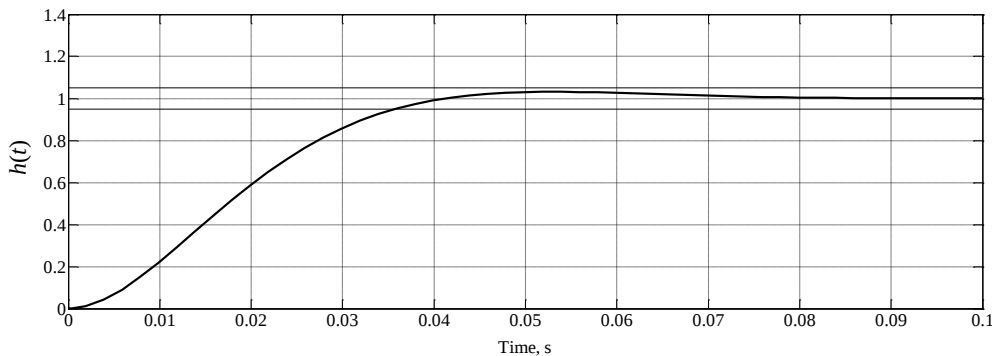


Рис. 2. График переходного процесса системы управления с ПИД-регулятором

Переходный процесс синтезированной системы управления с ПИД-
 регулятором апериодический. Результаты моделирования динамических ха-
 рактеристик разомкнутой системы показали существенную нелинейность
 дифференциальных уравнений объекта управления. Переходная характери-
 стика системы имеет статический характер. В линейном варианте она управ-
 ляема и с лучшим качеством переходного процесса, величина перерегулиро-
 вания меньше 5 %. Замкнутая система остается устойчивой с новым положе-
 нием равновесия $h(t)$.

На рис. 3 приведены зависимости изменения во времени напора для
 разных значений постоянной времени ($T_{k_1} = 0,5 \text{ с}$, $T_{k_2} = 5 \text{ с}$).

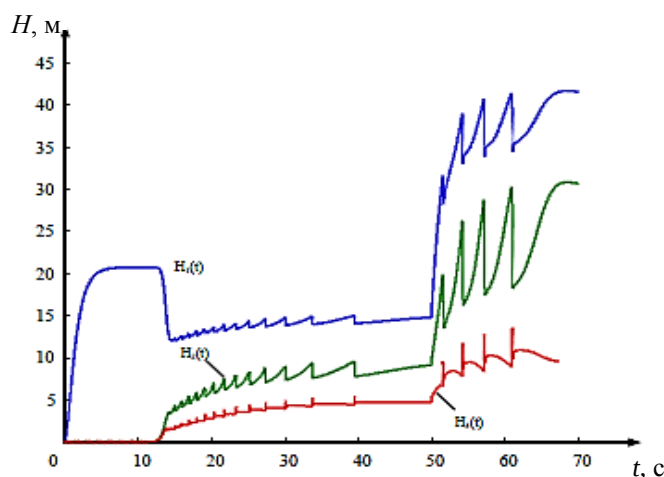


Рис. 3. Зависимости изменения во времени напора при $T_{k1} = 0,5$ с, $T_{k2} = 5$ с

Анализ кривых (рис. 3) показал, что в интервале 0–10 с происходит запуск насоса на закрытую задвижку, при этом напор на выходе соответствует значению напора при нулевой подаче и относительной частоте вращения рабочего колеса насоса $v = 0,5$. Момент времени $t = 10$ с характеризуется открытием задвижки на прилегающем к насосу участке трубопровода. При этом наблюдается снижение значения напора на выходе насоса $H_1(t)$. Нарастание давления происходит на участках трубопровода с одновременным увеличением расхода жидкости. Данный процесс повторяется, обуславливая резкое изменение гидравлического сопротивления трубопровода, и сопровождается пульсационным характером изменения технологических и энергетических параметров НК. Амплитуда пульсаций напора на участке, прилегающем к насосному агрегату, больше, чем на участке, находящемся непосредственно за напорным участком трубопровода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прокопьев, А.П. Идентификация нелинейной системы управления с ПИД-регулятором / А.П. Прокопьев, В.И. Иванчура, Р.Т. Емельянов // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'15) : труды X Международной конференции, 26–29 января 2015 г., Москва, ИПУ РАН. – М. : Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2015. – С. 387–397. – Условия доступа : http://www.sicpro.org/sicpro15/code/r15_08.htm
2. Аракелян, А.К. Коммуникационная сеть как динамический объект управления в системах регулируемого электропривода турбомеханизма / А.К. Аракелян, В.К. Тытюк // Исследование систем автоматизированных электроприводов : межвузовский сб. научных трудов. – Чебоксары, 1991. – С. 64–75.
3. Исследование автоматической системы управления с пропорционально-интегрально-дифференцированным регулированием / А.В. Цыганкова, Р.Т. Емельянов, Е.С. Спирин, К.В. Кириллов // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 10. – С. 243–247.
4. Потокораспределения трубопроводной системы отопления при независимом подключении циркуляционного насоса / А.В. Цыганкова, Р.Т. Емельянов, Ю.Л. Липовка, Н.А. Барабанщикова // Вестник КрасГАУ. – 2014. – № 12. – С. 200–204.
5. Цыганкова, А.В. Стабилизация температурного режима образовательных учреждений / А.В. Цыганкова А.М. Сташин // Формирование человеческого капитала ресурсами си-

- стемы образования : материалы III Всероссийской конференции. – Красноярск, 2016. – С. 149–151.
6. Влияние изменения теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери магистральных трубопроводов / Т.Н. Немова, Ю.А. Лежнева, Н.А. Цветков, Е.Г. Алексеева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 5 (58). – С. 151–160.
 7. Совершенствование методики измерения тепловой мощности отопительных приборов в реальных условиях эксплуатации / Н.А. Цветков, А.В. Жуков, Ю.О. Кривошеин, М.Г. Иванчин, А.Е. Токмаков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 6. – С. 141–148.
 8. Цветков, Н.А. Опыт разработки и внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий кафедры «Теплогазоснабжение» Томского ГАСУ / Н.А. Цветков // Технополис Югры. – 2015. – № 4. – С. 42–49.
 9. Structure-forming processes of cement composites, modified by sucrose additions / T.S. Shepelenko, U.S. Sarkisov, N.P. Gorlenko, N.A. Tsvetkov, O.A. Zubkova // Civil Engineering Journal. – 2016. – № 6 (66). – P. 3–11.
 10. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon / H. Orr, J. Wang, D. Fetsch, R. Dumont // Journal of Building Physics. – 2013. – V. 36. – P. 294–307.

REFERENCES

1. Prokop'ev A.P., Ivanchura V.I., Emelyanov R.T. Identifikatsiya nelineinoy sistemy upravleniya s PID-regulyatorom [Identification of nonlinear control system]. *Proc. 10th Int. Conf. 'System Identification and Control Problems' (SICPRO'15)*, Jan. 26–29 2015. Moscow. Available at: www.sicpro.org/sicpro15/code/r15_08.htm/ (rus)
2. Arakelyan A.K., Tytyuk V.K. Kommunikatsionnaya set' kak dinamicheskii ob"ekt upravleniya v sistemakh reguliruemogo elektropivoda turbomekhanizma [Communication network as dynamic object of control for electric drive systems in fluid-handling application]. *Int. Coll. Papers. Cheboksary*, 1991. Pp. 64–75. (rus)
3. Tsygankova A.V., Emel'yanov R.T., Spirin E.S., Kirillov K.V. Issledovanie avtomaticheskoy sistemy upravleniya s proporsional'no-integral'no-differentsirovannym regulirovaniem [Investigation of automatic control system with proportional-integral-differential control]. *Vestnik KrasGAU*. 2013. No. 10. Pp. 243–247. (rus)
4. Tsygankova A.V., Emelyanov T.R., Lipovka Yu.L., Barabanshikova N. The flow pipe of the heating system at the independent connection of the circulation pump. *Vestnik KrasGAU*. 2014. No. 12. Pp. 200–204. (rus)
5. Tsygankova A.V., Stashin A.M. Stabilizatsiya temperaturnogo rezhima obrazovatel'nykh uchrezhdenii [Stabilization of temperature control in educational institutions]. *Proc. 3rd All-Rus. Conf. 'Formation of Human Resources in Education'*. 2016. Pp. 149–151. (rus)
6. Nemova T.N., Lezhneva Yu.A., Tsvetkov N.A., Alekseeva E.G. Vliyanie izmeneniya teploprovodnosti teploizolyatsionnykh materialov na teplovye poteri magistral'nykh truboprovodov [Heat losses of main pipelines depending on thermal conductivity of insulation materials]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2016. No. 5. Pp. 151–160. (rus)
7. Tsvetkov N.A., Zhukov A.V., Krivoshein Yu.O., Ivanchin M.G., Tokmakov A.E. Sovershenstvovanie metodiki izmereniya teplovoi moshchnosti otopitel'nykh priborov v real'nykh usloviyakh ekspluatatsii [The improvement of heat power measuring techniques in actual operating conditions]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 6. Pp. 141–148. (rus)
8. Tsvetkov N.A. Opyt razrabotki i vnedreniya energo- i resursosberegayushchikh tekhnologii kafedry «Teplogazosnabzheniya» Tomskogo GASU [Development and implementation of energy-saving technologies at the Heat and Gas Supply Department of TSUAB]. *Tekhnopolis Yugry*. 2015. No. 4. Pp. 42–49. (rus)
9. Shepelenko T.S., Sarkisov U.S., Gorlenko N.P., Tsvetkov N.A., Zubkova O.A. Structure-forming processes of cement composites, modified by sucrose additions. *Civil Engineering Journal*. 2016. No. 6 (66). Pp. 3–11.
10. Orr H., Wang J., Fetsch D., Dumont R. Technical note: Airtightness of older-generation energy-efficient houses in Saskatoon. *Journal of Building Physics*. 2013. V. 36. Pp. 294–307.