

DOI 10.15589/jnn20160312

УДК 681.5

П50

ANALYSIS OF SUSTAINABILITY AND QUALITY OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF THE OBJECT WITH DELAY

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И КАЧЕСТВА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

Borys M. Politykin

e-mail: —

ORCID: —

Yurii H. Tenditnyi

e-mail: —

ORCID: —

N. V. Tenditnaia

e-mail: —

ORCID: —

Olha N. Korneliuk

olga.korneliuk@nuos.edu.ua

ORCID: —

Б. М. Политыкин,

д-р техн. наук, проф.

Ю. Г. Тендитный,

преп.

Н. В. Тендитная,

преп.

О. Н. Корнелюк,

преп.

Kherson branch of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Kherson

Херсонский филиал Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Херсон

Abstract. The results of theoretical studies of automatic regulation systems (ARS) of the object with delay are accounted. The differential equation of the controlled system and system elements on the basis of which the transfer function is composed of parts of the system is defined. The analysis of the stability of the system is made, evaluation of the effect of varying controller parameters on the system stability and analyses indicators of quality of transitional processes in ARS are counted, it is shown that the developed system meets specified requirements for stability and quality of transients applicable to the SAR of this type, and the results can be used in the development of such systems.

Key words: automatic regulation systems (ARS); sustainability; object with delay.

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований системы автоматического регулирования (САР) объекта с запаздыванием. Определены дифференциальные уравнения объекта регулирования и элементов системы. Проведен анализ устойчивости системы, сделана оценка влияния варьируемого параметра регулятора на устойчивость системы и проанализированы показатели качества переходных процессов в САР.

Ключевые слова: системы автоматического регулирования (САР); устойчивость, объект с запаздыванием.

Анотація. Наведено результати теоретичних досліджень системи автоматичного регулювання (САР) об'єкта з запізненням. Визначено диференціальні рівняння об'єкта регулювання і елементів системи. Проведено аналіз стійкості системи, зроблена оцінка впливу змінними параметрами регулятора на стійкість системи і проаналізовані показники якості перехідних процесів в САР.

Ключові слова: системи автоматичного регулювання (САР); стійкість, об'єкт з запізненням.

REFERENCES

- [1] Kukhtenko A. I., Svetlichnyy P. L., Shoykhet L. A., Shuris N. A. *Avtomatizatsiya ochistnykh i prokhodcheskikh rabot* [Automation of sewage and tunnel works]. Moscow, Gosgortekhzdat Publ., 1961. 276 p.
- [2] Besekerskiy V. A., Popov Ye. P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. Saint Petersburg, Professiya Publ., 2003.
- [3] Vasilev G. G., Didenko P. F. *Agregat shchitovoy vyemki ASHch : Mashiny i oborudovanie dlya mekhanizatsii i avtomatizatsii trudoemkikh protsessov v ugolnoy promyshlennosti* [The unit shield recess ASHCH: Machinery and equipment for mechanization and automation of labor-intensive processes in the coal industry], 1966, issue 3, pp. 15-18.
- [4] Mikhaylov A. V. *O novom podkhode issledovaniya zamknutykh reguliruemyykh sistem* [A new approach of research controlled closed systems]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1973, no. 8.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — проанализировать устойчивость системы при изменении коэффициента передачи регулятора в диапазоне от 0 до 2,1, а также определить качество переходного процесса в соответствии с предъявляемыми требованиями.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) приведена на рис. 1. Система включает объект регулирования (1), датчик нагрузки (2), элемент сравнения (3), задающее устройство (4), регулятор (5), исполнительный механизм (6), регулирующий орган (7), механизм подачи (8). Возмущающим воздействием $f(t)$ для системы является случайное изменение параметров внешней среды, формирующих нагрузку на объект. В качестве выходного регулируемого параметра в системе принята угловая скорость вращения вала двигателя привода резания агрегата. Входным регулирующим параметром является скорость механизма подачи агрегата. В качестве закона регулирования принят ПИ-закон регулирования.

В режиме автоматического регулирования система работает следующим образом: информация от датчика нагрузки (2) поступает на вход элемента сравнения (3) ПИ-регулятора и сравнивается с информацией от задающего устройства (4), результат сравнения усиливается ПИ-регулятором (5) и передаётся на вход исполнительного механизма (6), где преобразуется в перемещение регулирующего органа (7), который изменяет величину скорости подачи исполнительного органа (8) в соответствии с законом регулирования.

Объектом исследования является привод резания угледобывающего комплекса щитового агрегата [3], обладающего динамическими особенностями формирования нагрузки в процессе работы. Эти особенности обусловлены конструктивными характеристиками агрегата и режимами его функционирования. При постоянной скорости резания и изменяемой скорости подачи нагрузка на привод резания форми-

руется в соответствии с выражением для элемента среза [1]:

$$h = \int_{t-\tau}^t v_n(t) \cdot dt, \tag{1}$$

где h — элемент среза, м; $\tau = \ell / v_p$ — время перемещения режущего звена, с; ℓ — расстояние между звеньями, м; v_p — скорость резания, м/с.

Преобразование Лапласа для выражения (1) будет иметь вид [2]:

$$L [h(t)] = \int_{t-\tau}^t v_n(t) \cdot dt = \frac{1 - e^{-\tau p}}{p} \cdot v_n(p). \tag{2}$$

Выражение (2) определяет свойства объекта как динамического звена. Структурная схема звена может быть представлена в виде параллельного соединения двух звеньев, в одной ветви которого включено интегрирующее звено, а второе содержит последовательно включенные интегрирующее звено и звено с чистым запаздыванием τ . Передаточная функция этого звена совпадает с преобразованием Лапласа для прямоугольного импульса, имеющего длительность $\tau = \ell / v_p$, и относится к классу трансцендентных функций, что исключает возможность её точного моделирования. Поэтому при теоретических исследованиях такие звенья аппроксимируются алгебраическими полиномами, например, с применением ряда Паде. Как показали результаты анализа аппроксимации звена, допустимое приближение можно получить полиномом второго порядка [2, 4]:

$$\frac{1 - e^{-\tau p}}{p} \approx \frac{\tau}{1 + 1/2\tau p + 1/12\tau^2 p^2}, \tag{3}$$

где τ — время чистого запаздывания, с.

С учётом выражения (1) уравнение объекта регулирования будет иметь вид:

$$J_{np} \frac{d^2 \varphi_B}{dt^2} + b \frac{d \varphi_B}{dt} = M_n - M_o - D \cdot \int_{t-\tau}^t v_n(t) \cdot dt, \tag{4}$$

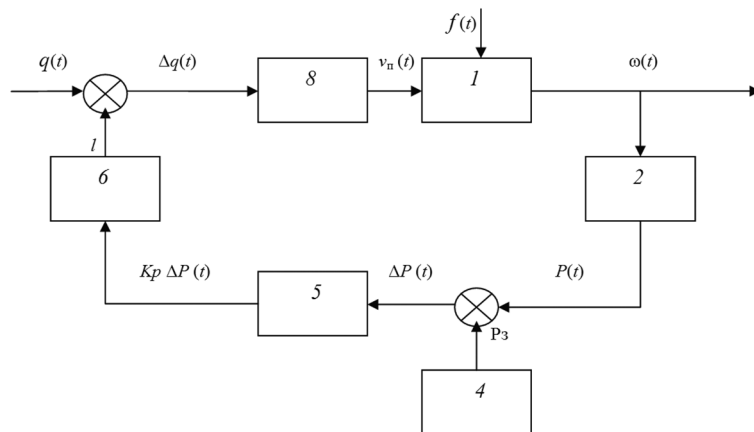


Рис. 1. Функциональная схема САР

где $J_{пр}$ — момент инерции ротора двигателя, $кг \cdot м^2$; $\phi_{в}$ — угол поворота вала двигателя; $b = M_{п} / \omega_{х}$ — угловой коэффициент двигателя, $н \cdot м \cdot с$; $M_{п}$ — пусковой момент двигателя, $н \cdot м$; $\omega_{х}$ — угловая скорость двигателя при холостом ходе, $1/с$; $M_{о}$ — момент сопротивления на валу двигателя при холостом ходе, $н \cdot м$; D — коэффициент, учитывающий условия резания, $н$.

Передаточная функция объекта регулирования с учётом (3, 4) и передаточные функции звеньев САР будут иметь вид:

1. Объект регулирования:

$$W_o(p) = \frac{\omega_d(p)}{\nu_n(p)} = \frac{D \cdot \tau}{(T_o p + 1)(1 + 1/2\tau p + 1/12\tau^2 p^2)}. \quad (5)$$

2. Датчик нагрузки:

$$W_d(p) = K_d / (T_d^3 p^3 + T_d^2 p^2 + T_d p + 1), \quad (6)$$

где K_d — коэффициент передачи датчика $н \cdot с / м^2$; T_d — постоянная времени датчика нагрузки, $с$.

3. ПИ-регулятор:

$$W_p(p) = K_p + 1/T_i, \quad (7)$$

где K_p — коэффициент передачи регулятора; T_i — время изодрома.

4. Исполнительный механизм (ИМ) и регулирующий орган (РО):

$$W_{им}(p) = K_{им} / (T_{им} p + 1), \quad (8)$$

где $K_{им}$ — коэффициент передачи ИМ и РО; $T_{им}$ — постоянная времени ИМ и РО, $с$.

5. Механизм подачи:

$$W_{мп}(p) = (T_{мп} p + 1) / (T_{мп}^3 p^3 + T_{мп}^2 p^2 + T_{мп} p + 1), \quad (9)$$

где $T_{мп}$ — постоянная времени механизма подачи, $с$.

На основании полученных передаточных функций звеньев системы была составлена структурная схема САР и проведен анализ её устойчивости с помощью критерия Найквист-Михайлова [4]. На рис. 2 показан годограф амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) разомкнутой САР.

Т. к. АФХ не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$, то, в соответствии с критерием Найквиста-Михайлова, САР устойчива. Запас устойчивости по амплитуде составляет $R = 37\%$, по фазе — $\phi = 35^\circ$.

Оценка влияния варьируемых параметров на устойчивость системы осуществлялась с помощью метода D -разбиения Ю. И. Неймарка [2], позволяющего определить область устойчивости системы в плоскости варьируемого параметра. В качестве такого параметра был принят коэффициент передачи регулятора K_p . Для построения области устойчивости было составлено характеристическое уравнение замкнутой системы:

$$J_3(p) = (T_o p + 1) \cdot (T_d^3 p^3 + T_d^2 p^2 + T_d p + 1) \times \\ \times (T_{им} p + 1) \cdot (T_{мп}^3 p^3 + T_{мп}^2 p^2 + T_{мп} p + 1) + \\ + K_c (T_{мп} p + 1) \cdot (1 - e^{-\tau p}) / p, \quad (10)$$

где $K_c = D_1 \cdot K_d \cdot K_p \cdot K_{им}$ — коэффициент передачи замкнутой системы.

Приравняв к нулю характеристическое уравнение, получим выражение для коэффициента передачи регулятора:

$$K_p(p) = -((T_o p + 1) \cdot (T_d^3 p^3 + T_d^2 p^2 + T_d p + 1) \times \\ \times (T_{им} p + 1) \cdot (T_{мп}^3 p^3 + T_{мп}^2 p^2 + T_{мп} p + 1)) / \\ / K_{c1} ((T_{мп} p + 1) \cdot (1 - e^{-\tau p}) / p), \quad (11)$$

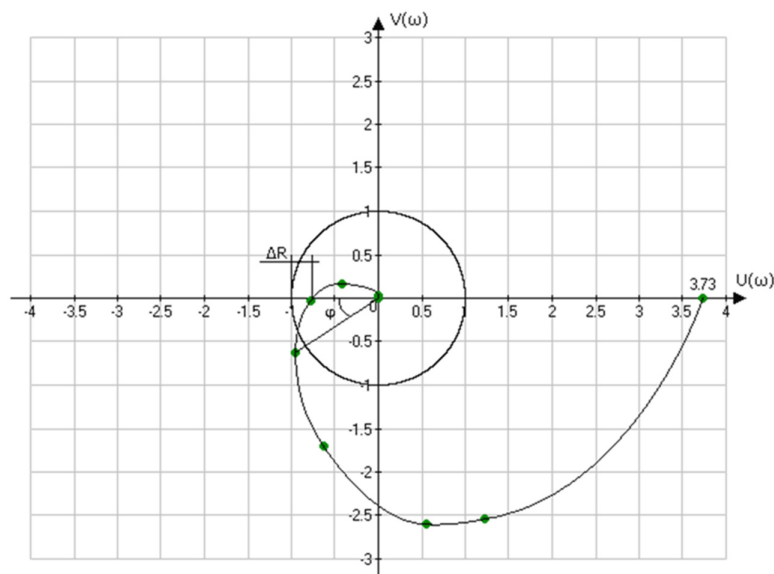


Рис. 2. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой САР

где $K_{cl} = D_1 \cdot K_d \cdot K_{им}$ — коэффициент системы без учёта K_p .

Для построения годографа Неймарка и определения области устойчивости в выражении (7) сделана замена p на $(j\omega)$. На рис. 3 приведена кривая D -разбиения при изменении ω от $-\infty$ до $+\infty$.

Т. к. кривая D -разбиения является отображением мнимой оси координат, то область устойчивости может находиться только слева от этой оси, если двигаться по ней в направлении от значения $\omega = -\infty$ до $\omega = +\infty$. Область устойчивости выделена на кривой штриховкой. Область, внутрь которой направлено больше штриховки, возможно является областью устойчивости исследуемой системы. Так как анализ

устойчивости системы был проведен при $Kp = 0,2$, а это значение находится в зоне устойчивости D — разбиения, то можно сделать вывод, что система будет устойчива в диапазоне изменения Kp от 0 до 2,1.

Расчёт переходных процессов в системе проводился с помощью второй теоремы разложения Хевисайда. Передаточная функция замкнутой САР была составлена по передаточным функциям (5–9).

На рис. 4 приведен график переходного процесса по расчётным данным. Как видно из рисунка переходной процесс имеет колебательный характер, число колебаний регулируемой величины $\lambda \leq 3$, перерегулирование, выраженное в процентах от установившейся величины $\sigma \leq 30\%$, время запаздывания $\tau \leq 10$ с.

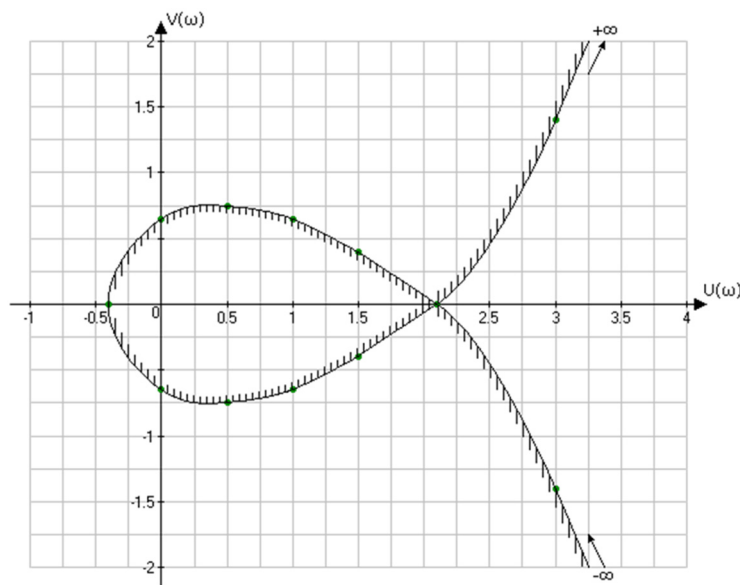


Рис. 3. Кривая D — разбиения плоскости K_p

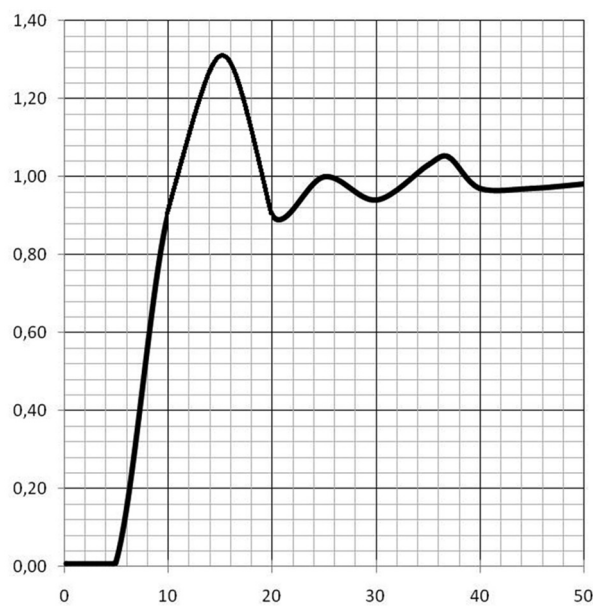


Рис. 4. График переходного процесса САР: — — $y(t)$

ВЫВОДЫ. В результате исследований установлено, что система устойчива и сохраняет устойчивость при изменении коэффициента передачи регулятора в диапазоне от 0 до 2,1, а качество переходного процесса соответствует предъявляемым требованиям.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Автоматизация очистных и проходческих работ [Текст] / А. И. Кухтенко, П. Л. Светличный, Л. А. Шойхет, Н. А. Шурис. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 276 с.
- [2] **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления [Текст] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — СПб. : Профессия, 2003.
- [3] **Васильев, Г. Г.** Агрегат щитовой выемки АЩ : Машины и оборудование для механизации и автоматизации трудоемких процессов в угольной промышленности [Текст] / Г. Г. Васильев, П. Ф. Диденко. — 1966. — Вып. 3. — С. 15–18.
- [4] **Михайлов, А. В.** О новом подходе исследования замкнутых регулируемых систем [Текст] / А. В. Михайлов. — Автоматика и телемеханика. — 1973. — № 8.

© Б. М. Політикін, Ю. Г. Тендітний, Н. В. Тендітняя, О. Н. Корнелюк

Надійшла до редколегії 18.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Г. В. Павлов*