

УДК 621.355.1

С. Ф. ЖУКОВ, А. И. ВАЖИНСКИЙ**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ**

Проведено дослідження поведінки промислових об'єктів в умовах наявності транспортного запізнювання в каналі зворотного зв'язку. Виконано математичне моделювання, досліджені частотні характеристики системи керування електротехнічним комплексом. Отримані теоретичні результати послужили основою для синтезу системи управління з ідентифікацією параметрів об'єкта і можливістю адаптивної настройки параметрів регуляторів.

Ключові слова: транспортне запізнювання, частотна характеристика, адаптація параметрів, система управління, предиктор.

Проведено исследование поведения промышленных объектов в условиях наличия транспортного запаздывания в канале обратной связи. Выполнено математическое моделирование, исследованы частотные характеристики системы управления электротехническим комплексом. Полученные теоретические результаты послужили основой для синтеза системы управления с идентификацией параметров объекта и возможностью адаптивной настройки параметров регуляторов.

Ключевые слова: транспортное запаздывание, частотная характеристика, адаптация параметров, система управления, предиктор.

To improve the management of industrial objects and to eliminate the time delay in measuring channel it is advisable to develop a model that takes into account the dynamics of the process. We have obtained mathematical model in tabular form or in the form of equations. As a result, we have found pulsed or transient characteristic of the object, as well as the corresponding spectral characteristics, which are used for structural and parametric identification. Selecting an optimal model based on the adequacy of regulatory criteria of quality and sustainability with minimum complexity of the model. We found an array of data, which characterized the parameters of the control object. This allowed us to determine the character of transition processes. New analytical dependences, which were obtained by mathematical modeling and simulation, confirmed in experimental studies, and became the basis for the synthesis of software. Analytical descriptions of process, which included in the predictive control model of electrical equipment, allowed us to minimize the effect of time delay in the measurement channel.

Key words: identification, the adaptive control system, the frequency characteristics of the measurement channel, the time delay.

Введение. Одна из основных проблем в управлении технологическими объектами – это проблема временного рассогласования управляющих воздействий и информации, передаваемой по каналам обратной связи, обусловленные расстояниями между исполнительными механизмами и устройствами измерения. Решением может служить построение системы автоматической настройки и адаптации. Объективные сложности, связанные с аппаратной и программной реализацией адаптивных систем управления, идентификацией параметров объекта управления, на современном этапе развития микропроцессорных устройств могут быть преодолены [1]. Вышесказанное определяет необходимость проведения исследований поведения различных объектов в условиях наличия задержек в канале обратной связи, математического описания на основе результатов идентификации и синтеза систем управления, обеспечивающих заданные выходные параметры и требуемую устойчивость.

Актуальность Автоматическая настройка и адаптация параметров регуляторов дают эффективные решения актуальных задач построения систем управления электротехническими комплексами. На этом этапе возникают проблемы, связанные с качеством настройки, влиянием внешних возмущений [2]. С точки зрения теории построения систем автоматизации SCADA – системы представляют собой системы, работающие в информационном режиме. Применение таких систем в управляющем и супервизорном режимах позволяет улучшить качество управления комплексами и, как следствие, добиться повышения качества производимой продукции.

Анализ предыдущих исследований. При автоматической настройке и адаптации используются те же методы идентификации и расчета параметров регулятора, что и в ручном режиме, однако автоматизация этих процессов существенно повышает качество регулирования. Наиболее эффективными являются методы настройки с применением микропроцессорной техники, включенной в контур регулирования. В [3] рассмотрена идентификация в замкнутом контуре для регулятора с встроенной моделью, с применением итерационных методов; в [4] использован генетический алгоритм. Применение методик требует запоминания и исследования истории протекания процесса в системе. Основным недостатком нечетких, нейросетевых, генетических алгоритмов является сложность их настройки. Настройка таких систем основывается на составлении базы нечетких правил и обучения нейронной сети. Регуляторы с внутренней моделью и методика их настройки рассмотрены в [5], приведено сравнение характеристик регуляторов, рассмотрены случаи наличия запаздывания в измерительном канале системы управления. Использование предиктора Смита для интегрирующих процессов предложено в работе [6]. Анализ данных источников показал, что для повышения качества управления сложными процессами необходимо применение систем автоматической настройки и адаптации.

Материалы исследования. Применение стандартных регуляторов в производственных технологиях даёт неудовлетворительные результаты, когда время запаздывания регулятора значительно превышает допустимое. Для исключения негативного влияния запаздывания на качество регулирования

применим алгоритм, который известен как «предиктор Смита». Выражения, описывающие объект управления при использовании предиктора Смита [2]:

$$P(p) = P_o(p)e^{-p\tau}, \tag{1}$$

$$\frac{\tau}{\tau + T} > 0,2 \dots 0,5, \tag{2}$$

$$R(p) = \frac{R_{PI}(p)}{1 + R_{PI}(p)(1 - e^{-p\tau})} \tag{3}$$

На рис. 1 представлена схема реализации предиктора Смита

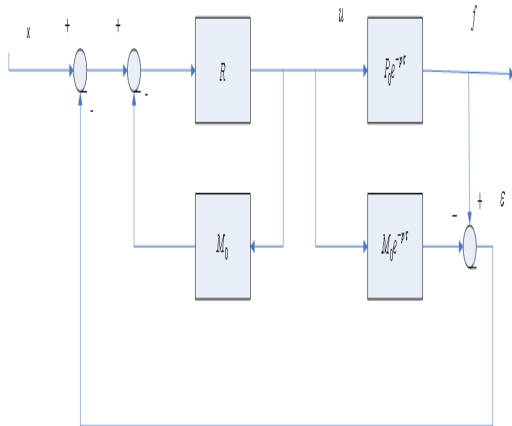


Рис. 1 – Схема управления с предиктором Смита

Здесь R – регулятор, $P_o e^{-p\tau}$ – передаточная характеристика объекта управления, M_o – модель объекта, x – текущее значение переменной, f – задание преобразователя частоты. Принцип работы системы состоит в следующем. Предположим, что модель абсолютна точна. Тогда разность сигналов на выходах модели и объекта будет равна нулю ($\epsilon = 0$). В таком случае непосредственно из схемы на рис.2.23 можно получить выражение (4):

$$f = P_o e^{-p\tau} \left(\frac{R}{1 + R M_o} \right) x = \left(\frac{P_o R}{1 + P_o R} \right) x. \tag{4}$$

В этом выражении член $\left(\frac{P_o R}{1 + P_o R} \right)$ представляет собой передаточную функцию системы без транспортной задержки. А это значит, что звено с транспортной задержкой не входит в контур обратной связи и не влияет на устойчивость и быстродействие системы, то есть происходит регулирование в контуре с моделью без задержки, а транспортная задержка только добавляется к полученному результату. Рассмотрим теперь работу предиктора Смита без предположения $\epsilon = 0$. В этом случае схему на рис. 2 можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} f &= P_o e^{-p\tau} R(x - \epsilon - M_o u), \\ \epsilon &= f - M_o e^{-p\tau} u, \\ f &= P_o e^{-p\tau} u. \end{aligned} \tag{5}$$

откуда получаем выражение (6)

$$f = \left[\frac{P_o R}{1 + R M_o + R(P_o - M_o)e^{-p\tau}} \right] e^{-p\tau} u. \tag{6}$$

Эквивалентная схема предиктора Смита представлена на рис. 2.

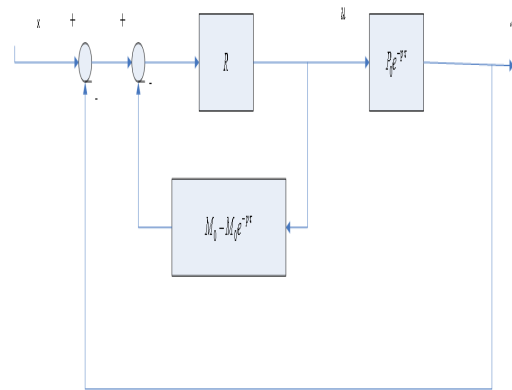


Рис. 2 – Эквивалентная схема предиктора Смита

В данной системе будем использовать схему управления с реакцией на время запаздывания (предиктор Смита). Если модель правильно идентифицирована, то с ее помощью можно предсказать выходную переменную, решая уравнения модели, т.е., не дожидаясь реакции объекта на управляющее воздействие [2,4].

Схема эксперимента с использованием модели объекта показана на рис. 3, где ОУ – объект управления, М – модель объекта.

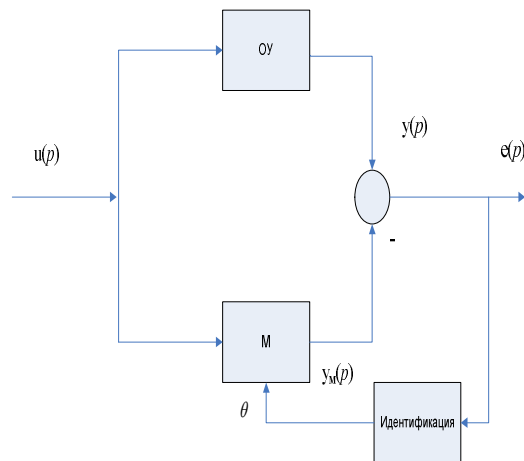


Рис. 3 – Схема проведения идентификации

Работа системы управления должна обеспечивать такой режим, в котором система устойчива. Устойчивость определяем по характеру переходного процесса и степени удаления системы от границы устойчивости. Для построения АФХ записывается передаточная функция разомкнутой системы

$$W(p) = W_p(p) W_{об}(p) = \frac{k_{об} k_p}{p} e^{-p\tau} об \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right). \tag{7}$$

Для получения частотных характеристик по передаточной функции выполняется подстановка $P = \omega(j - m)$, где m – степень колебательности системы. Тогда

$$W(m, j\omega) = \frac{k_{ia} k_p}{\omega(j-m)} e^{-\omega(j-m)\tau_{ia}} \left(1 + \frac{1}{T_e \omega(j-m)}\right) \quad (8)$$

С целью расчета частотных характеристик для различных значений частоты ω составлена программа. Результаты работы программы проиллюстрированы рис. 4 – 6.

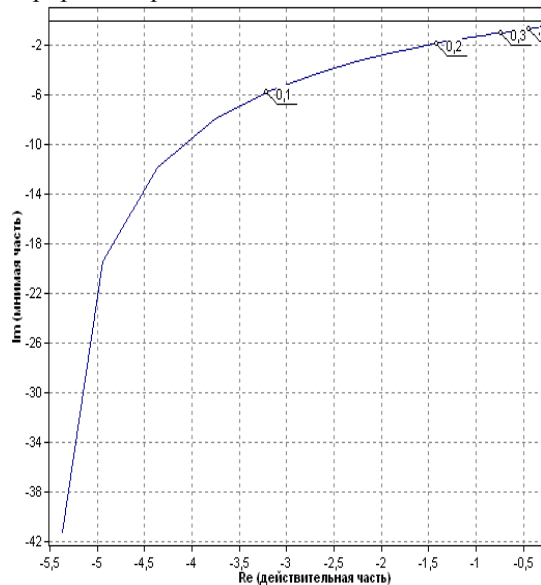


Рис. 4 – Годограф АФХ разомкнутой системы

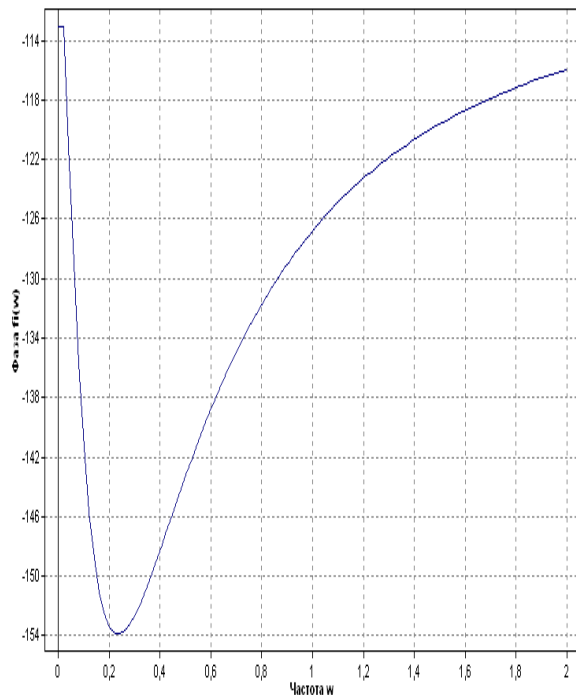


Рис. 5 – Годограф ФЧХ разомкнутой системы

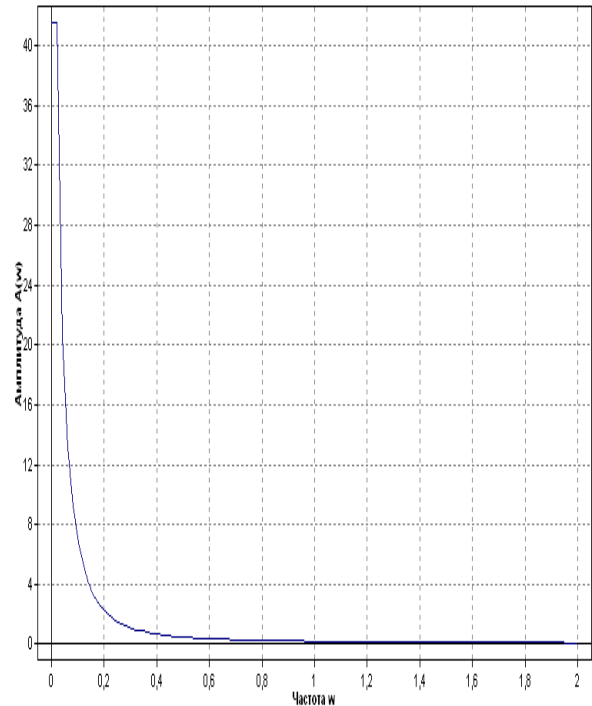


Рис. 6 – Годограф АЧХ разомкнутой системы

Объект управления описывается выражением

$$W_o(p) = \frac{0,95 \cdot e^{-8p}}{18,19 \cdot p^2 + 8,84 \cdot p + 1} \quad (8)$$

Перейдем от преобразований Лапласа к преобразованиям Фурье. Для этого сделаем замену $\delta = j\omega$ в выражении

$$W_o(j\omega) = \frac{0,95 \cdot e^{-8j\omega}}{18,19 \cdot (j\omega)^2 + 8,84 \cdot j\omega + 1} \quad (9)$$

Разложим знаменатель (9) на множители, получим выражение

$$W_o(j\omega) = \frac{0,95}{18,19} \cdot \frac{e^{-8j\omega}}{(j\omega + 0,1792) \cdot (j\omega + 0,3068)} = \frac{0,0522 \cdot e^{-8j\omega}}{(j\omega + 0,1792) \cdot (j\omega + 0,3068)} \quad (10)$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) имеет вид (11):

$$A(\omega) = |W(j\omega)|$$

$$A(\omega) = \frac{0,0522}{\sqrt{0,1792^2 + \omega^2} \cdot \sqrt{0,3068^2 + \omega^2}} \quad (11)$$

Годограф соответствующей АЧХ представлен на рис. 7.

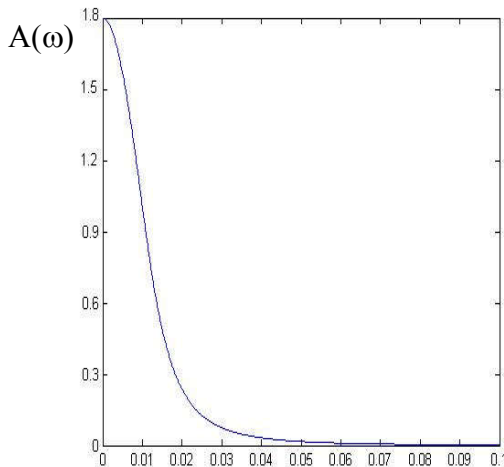


Рис. 7 – АЧХ исследуемой системы

Фазо-частотная характеристика (ФЧХ)

$$\varphi(\omega) = -8 \cdot \omega - \arctg\left(\frac{\omega}{0.1792}\right) - \arctg\left(\frac{\omega}{0.3068}\right). \quad (12)$$

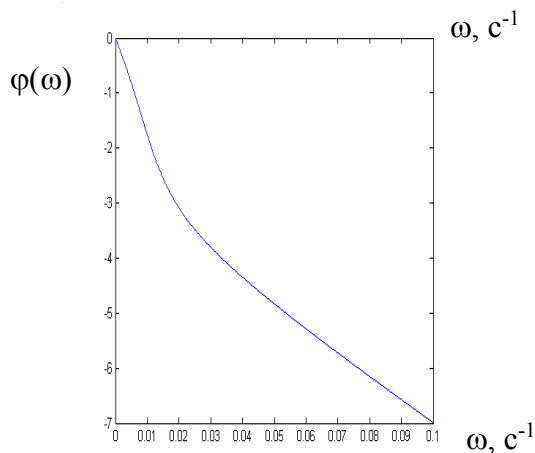


Рис. 8 – ФЧХ системы

Комплексная частотная характеристика (КЧХ):

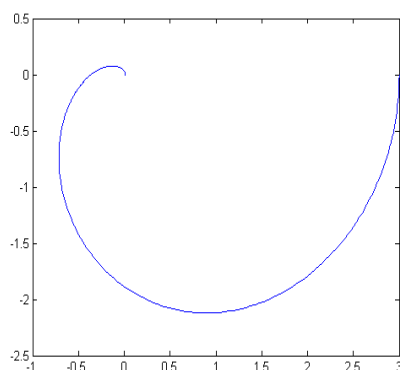


Рис. 9 – КЧХ системы

Результаты проведенных исследований и построения на их основе промышленных систем управления показали, что идентификация параметров системы управления электрическим оборудованием позволит производить автоматическую настройку и адаптацию коэффициентов регуляторов скорости вращения двигателей, входящих в состав оборудования. Идентификация выполняется с помощью анализа реакции на входной скачок, в замкнутом или разомкнутом контуре, по выбору пользователя. Обработанные системой визуализации данные служат основой для расчета частотной характеристики объекта, которая может быть отображена в виде диаграммы Боде, Найквиста. Отображаются также коэффициент передачи, постоянные времени и транспортная задержка (если есть) объекта.

Выводы:

1. Включение в предиктивную модель управления электрическим оборудованием аналитического описания системы позволяет учесть влияние временного запаздывания управляющих воздействий и повысить качественные показатели дозирования шихтовых материалов
2. Исследование переходных процессов в системе показало уменьшение времени регулирования и повышение запаса устойчивости, подтвердив эффективность применения усовершенствованной модели предиктора Смита
3. Повышение управляемости рядом объектов стало возможным благодаря применению системы управления электротехническим комплексом с адаптацией настроек регулятора
4. Дальнейшим направлением развития системы является сбор информации и углубление описания основных электротехнических комплексов металлургического производства с целью совершенствования диагностических возможностей и повышения качества регулирования систем управления.

Список литературы

1. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В.В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 608 с. 19. 2. Краснов И.Ю. Исследование системы автоматического высокоточного дозирования сыпучих материалов / И.Ю. Краснов // Известия томского политехнического университета. – 2007. – № 4. – С. 108 – 112 3. Karakawa K. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay / Karakawa K. Abe N., Ichihara H. // SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. 5-7 Aug. 2002. Vol. 3. P. 1592 – 1595. 4. Shigemasa T., Yukitomo M., Kuwata R. A model-driven PID control system and its case studies // Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications. 2002. Vol. 1. P. 571 – 576. 5. Pereira D.S., Pinto J.O.P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control // Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings. 2005 IEEE/ASME International Conference on. 2005. P. 801 – 806 6. Гриценко А.В. Улучшение качества алгоритма управления "Предиктор Смита" посредством автоматического вычисления времени запаздывания / А.В. Гриценко // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №12. – С. 32 – 37.

References (transliterated)

1. Denisenko, V.V. *Kompyuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniyem* [Computerizing process control, experiment, equipment] Moscow, Hotline – Telecom Publ, 2009 608 p. 2. Krasnov I.Yu. [Research of automatic precision dosing system of bulk materials], *Izvestiya tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2007. no. 2, pp.108-112. 3. Karakawa K., Abe N., Ichihara H. Joint design method of closed-loop identification and IMC structure for temperature control system with time delay // SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference. 5-7 Aug. 2002. Vol. 3. P. 1592 – 1595. 4. Shigemasa T., Yukitomo M., Kuwata

R. A model-driven PID control system and its case studies // Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications. 2002. Vol. 1. P. 571 – 576. 5. Pereira D.S., Pinto J.O.P. Genetic algorithm based system identification and PID tuning for optimum adaptive control // Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings. 2005 IEEE/ASME International Conference on. 2005. P. 801 – 806. 6. Gritsenko A.V. 2004, [Improving the quality of the control algorithm "Smith Predictor" by automatically calculating the time delay], *Promyshlennyye ASU i kontrolyery*, no.12, pp.32-37.

Поступила (received) 15.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Адаптивна система керування електротехнічним комплексом / С. Ф. Жуков, А. І. Вазинський // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 35 –39. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Адаптивная система управления электротехническим комплексом / С. Ф. Жуков, А. И. Вазинский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – X. : НТУ «ХПІ», 2017.– No 31 (1253). – С. 35 –39 . Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2224-0349.

Adaptive control system of electrical equipment /S. F. Zhukov, A. I. Vazhinsky // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energetics: reliability and energy efficiency.– Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1235). – P. 35 –39 . – Bibliogr.: 6. – ISSN 2224-0349.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Жуков Станіслав Федорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Електричні станції» ; тел.: (0629) 41-10-47; e-mail sfg@quantum.com.ua

Жуков Станіслав Федорович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Электрические станции», тел.: (0629) 41-10-47; e-mail sfg@quantum.com.ua

Zhukov Stanislav Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Department of Electric power plant тел.: (0629) 41-10-47; e-mail sfg@quantum.com.ua

Вазинський Антон Іванович – кандидат технічних наук, начальник дільниці, ПрАТ «МК «АЗОВ-СТАЛЬ», тел. : (0629) 46-64-87; e-mail: new0304@rambler.ru

Вазинский Антон Иванович – кандидат технических наук, начальник участка, ПрАТ «МК «АЗОВ-СТАЛЬ», тел. : (0629) 46-64-87; e-mail: new0304@rambler.ru

Vazhinsky Anton Ivanovych – Candidate of Technical Sciences , foreman of section, PJSC Azovstal Iron & Steel Works, tel (0629) 46-64-87; e-mail new0304@rambler.ru