

Научная статья

УДК 681.5

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-67-78>

Оптимизация цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта

В. А. Доровской¹✉, А. А. Зинченко², Е. Г. Зинченко³, П. А. Ерофеев⁴, Д. А. Мазин⁵

^{1, 3-5} Керченский государственный морской технологический университет,
Керчь, Россия, dora1943@mail.ru ✉

² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Проведено исследование оптимизации цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта. Проанализирован порядок замены непрерывного регулятора на дискретный. Проиллюстрирована исходная непрерывная оптимизированная система автоматического регулирования. Отмечено, что непрерывная система автоматического регулирования целиком и ее элементы (все либо некоторые) могут быть промоделированы дискретными моделями, описываемыми разностными, а не дифференциальными, как в случае непрерывных моделей, уравнениями. Приведено задание периода дискретизации модели ПИ-регулятора, равного 0.001 с, рассматриваются коэффициенты Z-передаточной функции цифрового ПИ-регулятора, эквивалентного непрерывному регулятору. Практическое значение в теории управления имеет представление дискретной моделью регулятора, что позволяет получить алгоритм цифрового преобразования, осуществляемого регулятором над ошибкой регулирования, организовать дискретно-цифровое управление непрерывным объектом с помощью цифрового процессора. Проиллюстрирована модель с непрерывным и дискретным регулятором. Получена формула вычисления значений решетчатой функции выходного сигнала дискретного регулятора. Установлено, что дискретизацию, квантование сигнала ошибки и восстановление сигнала управления следует осуществлять с должной точностью, которая должна обеспечивать требуемую точность регулирования. Рассматриваются модели с дискретно-цифровым управлением при верном подборе параметров дискретных ПИ-регуляторов, модель с конечным временем переходного процесса и структура ее контура, приведена дискретная функция пятого порядка с пятиступенчатым переходом в установившийся режим. Сделаны выводы о том, что уменьшение периода дискретизации и шага квантования существенно повышает требования к быстродействию процессора.

Ключевые слова: оптимизация, цифровой регулятор, система автоматического регулирования, непрерывный объект, судно, критерий

Для цитирования: Доровской В. А., Зинченко А. А., Зинченко Е. Г., Ерофеев П. А., Мазин Д. А. Оптимизация цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 67–78. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-67-78>.

Original article

Optimizing digital controller of continuous object automatic control system

V. A. Dorovskoy¹✉, A. A. Zinchenko², E. G. Zinchenko³, P. A. Erofeev⁴, D. A. Mazin⁵

^{1, 3-5} Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Russia, dora1943@mail.ru ✉

² Saint-Petersburg State Marine Technical University,
Saint-Petersburg, Russia

Abstract. The article gives the analysis of optimizing the digital controller of the automatic control system (ACS) of a continuous object. The procedure for replacing a continuous controller with a discrete controller has been analyzed. The original continuous optimized ACS has been illustrated. It has been stated that the continuous ACS and its elements (all or particular) can be modeled by discrete models described by the difference equations, and not the differential ones, as is done in the case of continuous models. The specification of the sampling period of the PI controller model equal to 0.001 s has been given, the coefficients of the Z-transfer function of the digital PI controller, which is equivalent to a continuous controller, are considered. Of practical importance in the control theory is the representation of a discrete model of a controller, which helps obtain a digital transformation algorithm carried out by a controller over a control error, organize a discrete-digital control of a continuous object using a digital processor. The model with a continuous and discrete controller is illustrated. A formula for calculating the values of the lattice function

of the output signal of a discrete controller is obtained. It has been found that sampling and quantization of the error signal, as well as restoring the control signal, should be carried out with the proper accuracy, which should provide the required control accuracy. There are considered the models of discrete-digital control with the correct selection of the parameters of discrete PI controllers, a model with a finite time of the transient process and a structure of its contour, given a fifth-order discrete function with a five-step transition to the steady state. It has been inferred that reducing the sampling period and quantization step significantly increases the processor speed requirements.

Keywords: optimization, digital regulator, automatic control system, continuous facility, vessel, criterion

For citation: Dorovskoy V. A., Zinchenko A. A., Zinchenko E. G., Erofeev P. A., Mazin D. A. Optimizing digital controller of continuous object automatic control system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;1:67-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-67-78>.

Введение

Коммерческие суда, в сравнении с военными, медлительнее употребляют потенциал полной встроенной автоматизации в сферы. Увеличение уровня судовой автоматизации и систем интеграционной мобильности способствует значительной экономии и снижению издержек [1–3].

Военные суда довольно продолжительное время используют встроенные системы, которые способны установить связь с разными судовыми элементами и системами – главным образом защитными и оружейными площадками – и объединить их в один контрольный и наблюдательный пункт. На данный момент системы автоматизации корабля позволяют разным и географически разрозненным элементам объединиться и вести взаимодействие, почти всеми системами возможно управлять удаленно.

На торговых судах и военных кораблях по всему миру употребляются судовые системы управления и автоматизации для усовершенствования работы корабельных движков, поворотных движителей, балласта, двигательных установок, управляющих устройств и т. д. Единая судовая архитектура обязана обеспечивать управление и визуализацию в масштабах всего корабля.

Актуальность, цель и задачи исследования

Разделим методы оптимизации дискретно-цифровых регуляторов системы автоматического регулирования (САР) непрерывными объектами на методы замены оптимального непрерывного регулятора дискретно-цифровым в соответствии с выбран-

ным критерием совпадения свойств САР с непрерывным и квазинепрерывным управлением, а также на методы непосредственной оптимизации дискретно-цифрового регулятора с непрерывным объектом в контуре в соответствии с критерием близости оптимизированной САР к инвариантной или в соответствии с другим критерием [2–5]. Целью настоящего исследования является оптимизация цифрового регулятора САР непрерывного объекта.

Порядок замены непрерывного регулятора дискретным

Пусть дана непрерывная САР, регулятор которой уже оптимизирован одним из методов. Замена непрерывного ПИ-регулятора осуществляется в соответствии с указаниями, приведенными в работах [6–9]. Для этого нужно скопировать оптимизированную САР, поместить ее ниже на рабочем поле для сравнения результатов и подключить ее к генератору ступеньки и осциллографу. Далее следует нажать правой кнопкой по блоку ПИ-регулятора в копии САР, а в появившемся окне выбрать кнопку Convert S → Z. В появившемся окне задать значение периода дискретизации, равный этой величине. Для выбора периода дискретизации нужно обратиться к постоянным времени объекта управления. Согласно рис. 1 наибольшая постоянная времени объекта равна 2 с, следующая по величине равна $0.4 / 2 = 0.2$ с, и последняя: $0.01 / (2 \cdot 0.4) = 0.0125$ с.

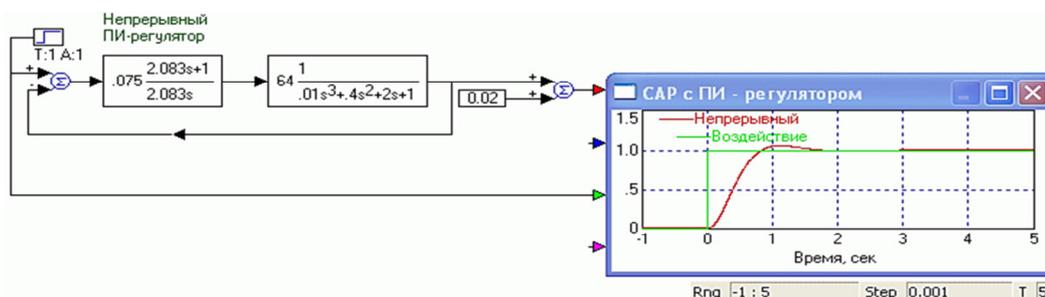


Рис. 1. Исходная непрерывная оптимизированная САР

Fig. 1. Initial continuous optimized ACS

Таким образом, период дискретизации следует выбрать меньшим, чем наименьшая постоянная времени, для начала, например, равным шагу моделирования 0.001 с (рис. 2).

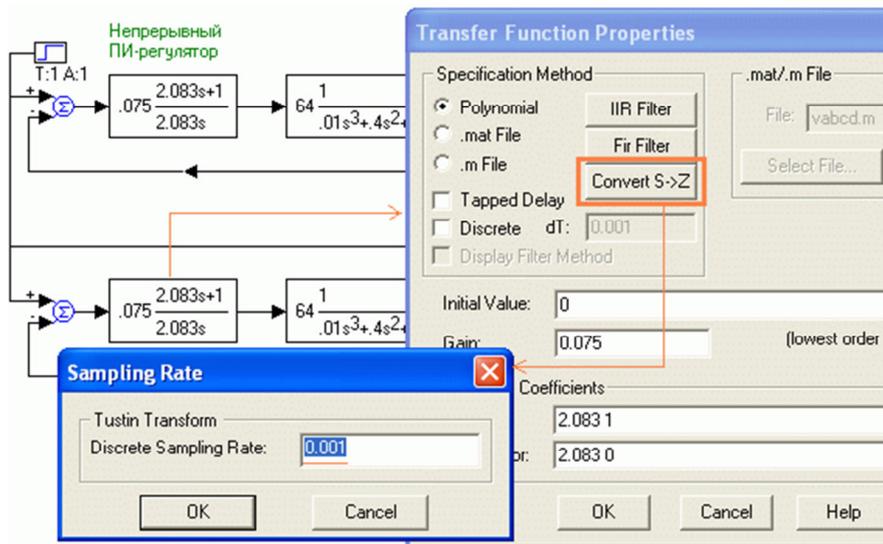


Рис. 2. Задание периода дискретизации дискретной модели ПИ-регулятора, равного 0.001 с

Fig. 2. Setting a sampling period of the discrete model of the PI controller equal to 0.001 s

Нажимая кнопку ОК, получаем пересчитанные значения коэффициентов, т. е. значения коэффициентов Z-передаточной функции (рис. 3).

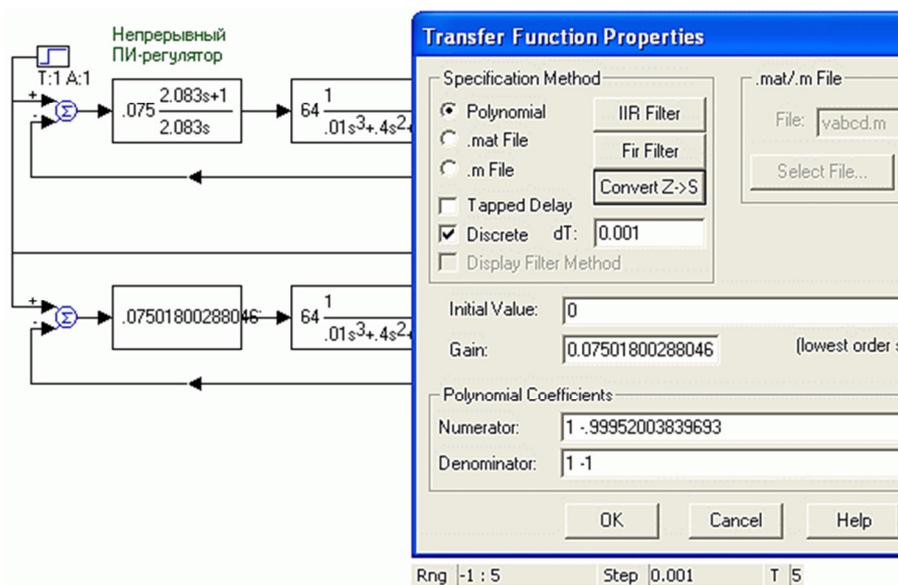


Рис. 3. Окно с коэффициентами Z-передаточной функции цифрового ПИ-регулятора, эквивалентного непрерывному регулятору

Fig. 3. Window with coefficients of the Z-transfer function of a digital PI controller equivalent to a continuous controller

Нажимая кнопку ОК, получаем модель САУ с цифровым управлением непрерывным объектом с периодом дискретизации, равным 0.001 с, кото-

рую можно запустить на счет для сравнения переходных характеристик моделей (рис. 4) [7, 10–12].

Для удобства сравнения переходная функция

непрерывной САР приподнята на 0.02 единицы. Тем не менее полезно посмотреть на поведение САР и при больших значениях периода дискретизации, что позволит снизить вычислительную

нагрузку на цифровой процессор компьютера, который будет осуществлять функции регулятора в производственных условиях. Увеличим в 10, а затем и в 100 раз период дискретизации (рис. 5).

Доровской В. А., Зинченко А. А., Зинченко Е. Г., Ерофеев П. А., Мазин Д. А. Оптимизация цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта



Рис. 4. Выбранный период дискретизации с цифровым управлением непрерывной САР

Fig. 4. A selected sampling period with digitally controlled continuous ACS



Рис. 5. Модель с непрерывным и дискретным регулятором

Fig. 5. The model with a continuous and discrete controller

Если период дискретизации, равный 0.01 с, еще обеспечивает соответствие свойств непрерывной САР и САР с дискретным управлением, то дискретизация с периодом 0.1 с для заданного объекта приводит к существенным отличиям от оптимизи-

рованной непрерывной САР. Тем не менее САР с цифровым управлением с периодом дискретизации, равным 0.1 с, обеспечивает слежение, хотя и с несколько завышенным значением перерегулирования, равным 20 %.

Определение алгоритма работы цифрового регулятора

На цифровой регулятор подается непрерывный сигнал ошибки с устройства сравнения (сумматора). Поэтому сигнал ошибки необходимо предварительно дискретизировать и квантовать, т. е. преобразовать в последовательность числовых значений ошибки, следующих с периодом дискретизации, а затем уже подавать на цифровой процессор [12–16]. Эту функцию в реальной системе выполняет специальное устройство АЦП (аналогово-цифровой преобразователь). Алгоритм работы с дискретизированным сигналом определяется Z-передаточной функцией ПИ-регулятора, которая уже получена (рис. 5). Построим цифровой алгоритм обработки для ПИ-регулятора с периодом дискретизации, равным 0.01 с.

Исходное выражение Z-передаточной функции дискретного ПИ-регулятора:

$$W_{\text{ПИ}}(z) = 0.075180028804609 \times \frac{z - 0.99521072796935}{z - 1}$$

Числитель и знаменатель разделены на старшую степень знаменателя, т. е. на z , и домножены на -1 :

$$W_{\text{ПИ}}(z) = 0.07518 \cdot \frac{0.99521 \cdot z^{-1} - 1}{z^{-1} - 1}$$

Z-изображение выходного сигнала ПИ-регулятора:

$$Y_{\text{ПИ}}(z) = W_{\text{ПИ}}(z) \cdot E(z)'$$

Переход к оригиналам, к решетчатым функциям, во временную область:

$$Y_{\text{ПИ}}(z) = Y_{\text{ПИ}}(z) \cdot z^{-1} + 0.07518 \times (E(z) - 0.99521 \cdot z^{-1} \cdot E(z))' \quad (1)$$

Полученная формула указывает алгоритм преобразования решетчатой функции, подаваемой с АЦП на цифровой ПИ-регулятор, параметры которого определены для периода дискретизации, равного 0.01 с. Алгоритм представлен на рис. 6.

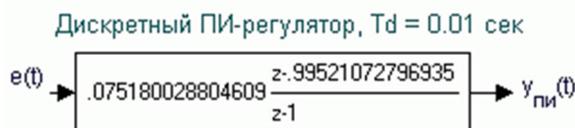


Рис. 6. Получение формулы вычисления значений решетчатой функции выходного сигнала дискретного регулятора

Fig. 6. Deriving a formula for calculating the values of the lattice function of the output signal of a discrete controller

Согласно формуле (1) очередное на текущем такте значение выходного сигнала ПИ-регулятора определяется как сумма предыдущего его выходного значения и взвешенной с коэффициентом 0.07518 разности текущего и предыдущего, умноженного на 0.995211, значения входного сигнала (ошибки регулирования). Этот алгоритм легко может быть реализован на любом языке программирования, поддерживаемом тем компьютером, на который подается дискретизированный и квантованный сигнал, в том числе на языках Ассемблер, C++, Delphi и др., а также в виде структурной схемы в программах объектно-ориентированного моделирования, например VisSim, Simulink.

На вход цифрового процессора, реализующего алгоритм работы регулятора, подается цифровая решетчатая функция ошибки регулирования, а на выходе получается цифровая решетчатая функция управляющего сигнала объекта управления, которую следует преобразовать в непрерывный сигнал специальным фильтром, например ФНЧ или фильтром-защелкой (фиксатором значений на период дискретизации). Предлагается пример реализации цифрового алгоритма ПИ-регулятора в программе VisSim.

Построение модели алгоритма цифрового регулятора

В соответствии со сформулированным выше алгоритмом в VisSim может быть построена структурная схема, выполняющая его. Отметим, что в этой схеме модель дискретизатора построена на управляемом ключе merge, в то время как в схеме (рис. 7) использована эквивалентная в математическом смысле операция перемножения стробирующих импульсов и входного сигнала.

Система автоматического регулирования с конечным временем регулирования (квазиинвариантная САР)

Математический аппарат Z-передаточных функций изначально предназначен для описания дискретно-цифровых регуляторов систем управления непрерывными объектами. Этот же аппарат широко применяется для описания цифровых систем передачи информации, обеспечивающих высокую помехозащищенность каналов передачи и (при необходимости) шифрования данных [12, 15, 16]. Тем не менее Z-передаточными функциями с успехом может быть промоделирован и непрерывный объект и вся САР при достаточно малых периоде дискретизации и шаге квантования. Как было отмечено выше, САР с Z-передаточной функцией, имеющей в характеристическом полиноме только старшую степень, устойчива и переходный процесс в ней заканчивается за конечное число периодов дискретизации, равное степени характеристического полинома (рис. 8) [13, 16, 17].

Доровакой В. А., Зинченко А. А., Зинченко Е. Г., Ерофеев П. А., Мазин Д. А. Оптимизация цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта

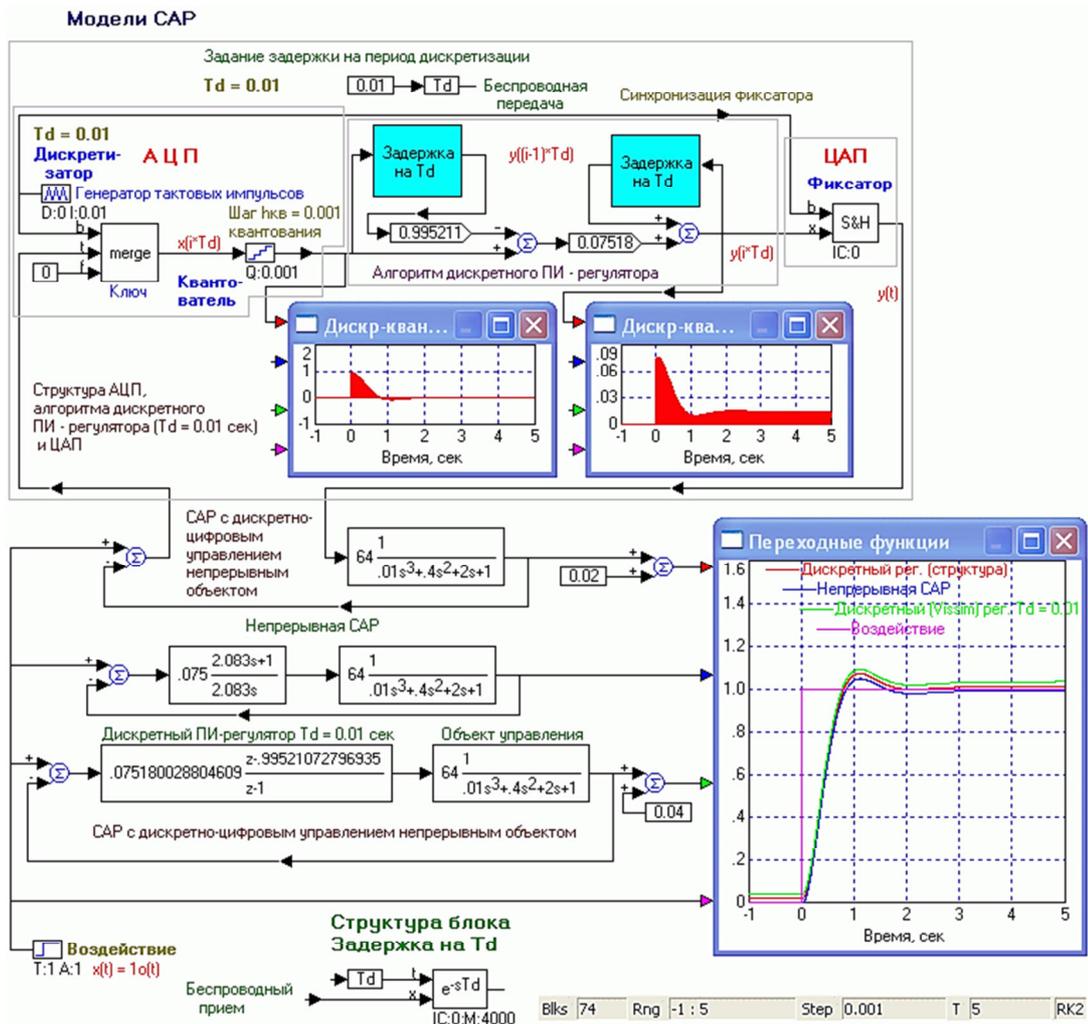


Рис. 7. Модели с дискретно-цифровым управлением при правильном подборе параметров дискретных ПИ-регуляторов

Fig. 7. Discrete digital control models with the correct selection of parameters of discrete PI controllers

Квазиинвариантные дискретные АИСАР

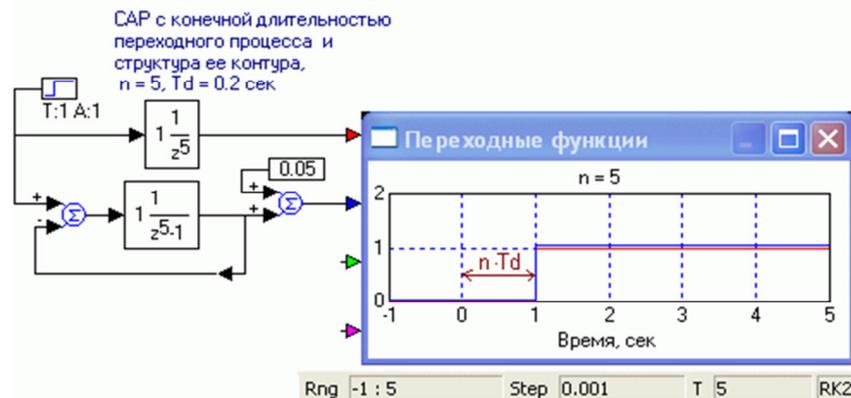


Рис. 8. Дискретная модель с конечным временем переходного процесса и структура ее контура

Fig. 8. A discrete model with a finite time of the transient process and the structure of its contour

Степень характеристического полинома модели САР пятая, поэтому переходный процесс заканчивается за $5 \cdot T_d = 1$ с, по существу, такая САР осуществляет в данном случае задержку на 1 с. Если эта задержка пренебрежимо мала по сравнению со временем разгона объекта, а именно из таких соображений и следует выбирать период дискретизации, то САР можно считать практически инвариантной (безынерционной) по отношению к сигналу задания. Структура контура рассматриваемой квазиинвариантной дискретной САР вытекает из известного соотношения между передаточной функцией замкнутого и передаточной функцией разомкнутого контура САР:

$$\Phi_{\text{замкн}}(z) = \frac{1}{z^5};$$

$$W(z) = \frac{\Phi_{\text{замкн}}(z)}{1 - \Phi_{\text{замкн}}(z)};$$

$$W(z) = \frac{1}{(z^5 - 1)}.$$

Таким образом, реакция на ступенчатое воздействие квазиинвариантной дискретной САР – это ступенчатая функция с некоторой, малой задержкой относительно входного воздействия. Многие реальные системы, обладая инерцией, потребовали бы для инвариантного управления подведения неоправданно большой мощности, что могло бы приводить и к выходу из строя объекта управления или его источников питания. Передний фронт квазиинвариантной САР в некоторой степени можно несколько сгладить, задавая в числителе Z-передаточной функции САР некоторый полином, со степенью меньшей, чем степень характери-

стического полинома. Полином числителя не влияет на устойчивость САР, поэтому в выборе его коэффициентов допускается некоторый произвол, которым можно воспользоваться для задания хорошего вида переднего фронта переходной функции. Во-первых, для удобства коэффициенты числителя следует выбирать так, чтобы их сумма была равной 1. Во-вторых, коэффициенты могут быть выбраны равными или – для некоторого смягчения переднего фронта – они могут быть выбраны сначала по нарастающей, а затем (с середины полинома) к его свободному члену – по убывающей [12, 18, 19]:

$$\Phi_{\text{замкн}}(z) = \frac{0.2z^2 + 0.6z + 0.2}{z^3};$$

$$W(z) \rightarrow \frac{0.2z^2 + 0.6z + 0.2}{z^3 \left| 1 - \frac{0.2z^2 + 0.6z + 0.2}{z^3} \right|};$$

$$\text{simplify} \rightarrow \frac{z^2 + 3z + 1}{5z^3 - 1z^2 - 3z - 1};$$

$$W(z) = \frac{z^2 + 3z + 1}{5z^3 - 1z^2 - 3z - 1};$$

$$W(z) = \frac{0.2z^2 + 0.6z + 0.2}{z^3 - 0.2z^2 - 0.6z - 0.2}.$$

Переходная функция дискретной системы достигает установившегося значения за три такта, причем первая и последняя ступеньки относительно малы, они равны 0.2 (см. коэффициенты числителя верхнего звена), а средняя больше, равна 0.6, что несколько сглаживает фронт нарастания (рис. 9).

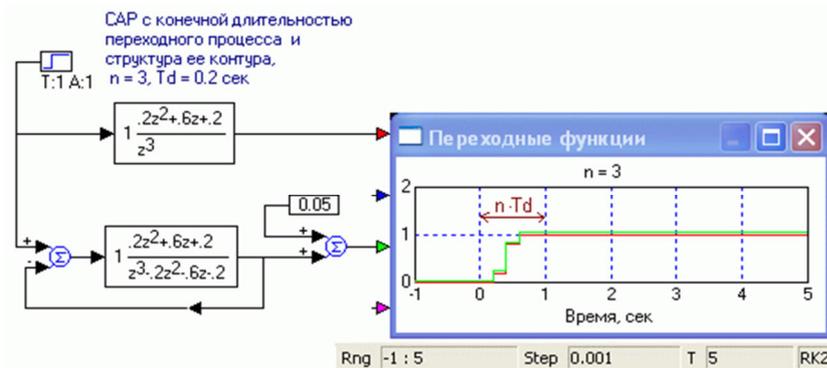


Рис. 9. Переходная функция

Fig. 9. Transition function

Внизу приведена структура контура. Для получения характеристического полинома разомкнутого контура достаточно вычесть числитель Z-передаточной

функции замкнутой САР из его знаменателя. Еще один пример – для системы пятого порядка – приведен на рис. 10.

Доровской В. А., Зинченко А. А., Зинченко Е. Г., Ерофеев П. А., Мазин Д. А. Оптимизация цифрового регулятора системы автоматического регулирования непрерывного объекта

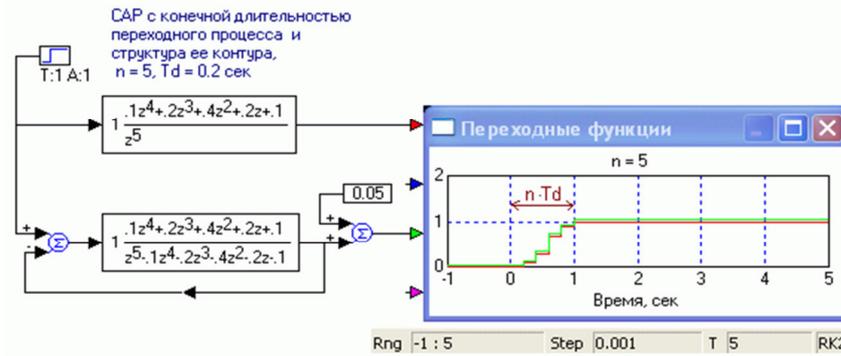


Рис. 10. Дискретная функция пятого порядка с пятиступенчатым переходом в установившийся режим

Fig. 10. A discrete function of the fifth order with a five-step transition to a steady mode

Сумма коэффициентов числителя выбрана равной 1, характеристический полином (знаменатель передаточной функции) разомкнутого контура может быть получен вычитанием числителя Z-передаточной функции замкнутой САР из ее знаменателя. Знание Z-передаточной функции разомкнутого контура квазиинвариантной САР дает ориентир, к которому можно стремиться при оптимизации САР с дискретным управлением непрерывным объектом путем коррекции регулятора [13–16]. Однако полностью устранить инерцион-

ность объекта управления на практике не удастся да и, как правило, не требуется.

О точности представления непрерывного объекта дискретно-цифровой моделью

Непрерывная модель объекта может быть заменена, аппроксимирована дискретно-цифровой моделью при условии, что период дискретизации значительно меньше, чем наименьшая постоянная времени объекта (рис. 11).

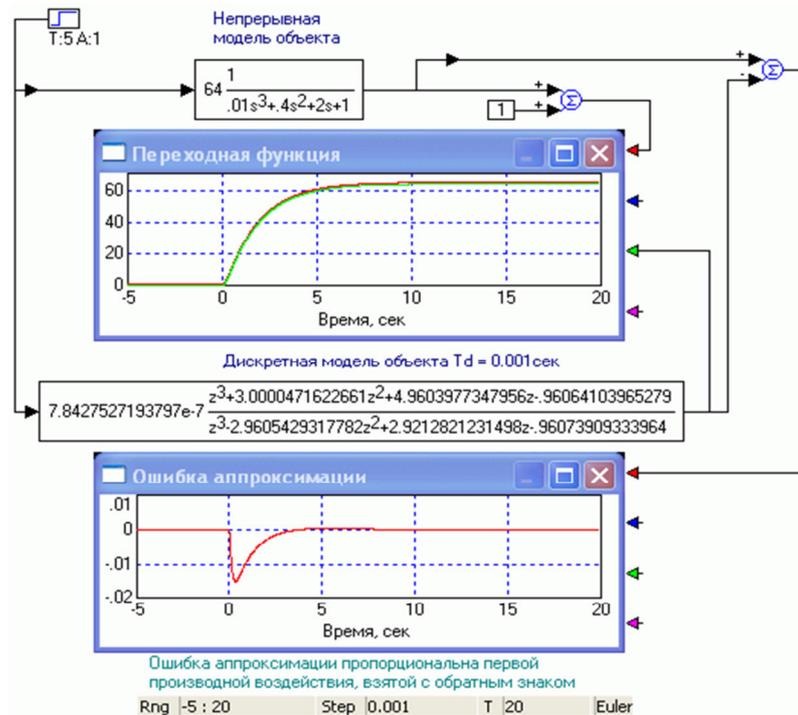


Рис. 11. Дискретная модель с хорошим приближением аппроксимирует непрерывную при шаге дискретизации Td, равном шагу моделирования

Fig. 11. A discrete model with a good approximation approximates a continuous one with a sampling step Td equal to the modeling step

Погрешность аппроксимации напрямую зависит от скорости изменения выходного сигнала модели, пропорциональна его производной по време-

ни и составляет в этом случае менее 0.02 %. При увеличении шага дискретизации ошибка пропорционально увеличивается (рис. 12).

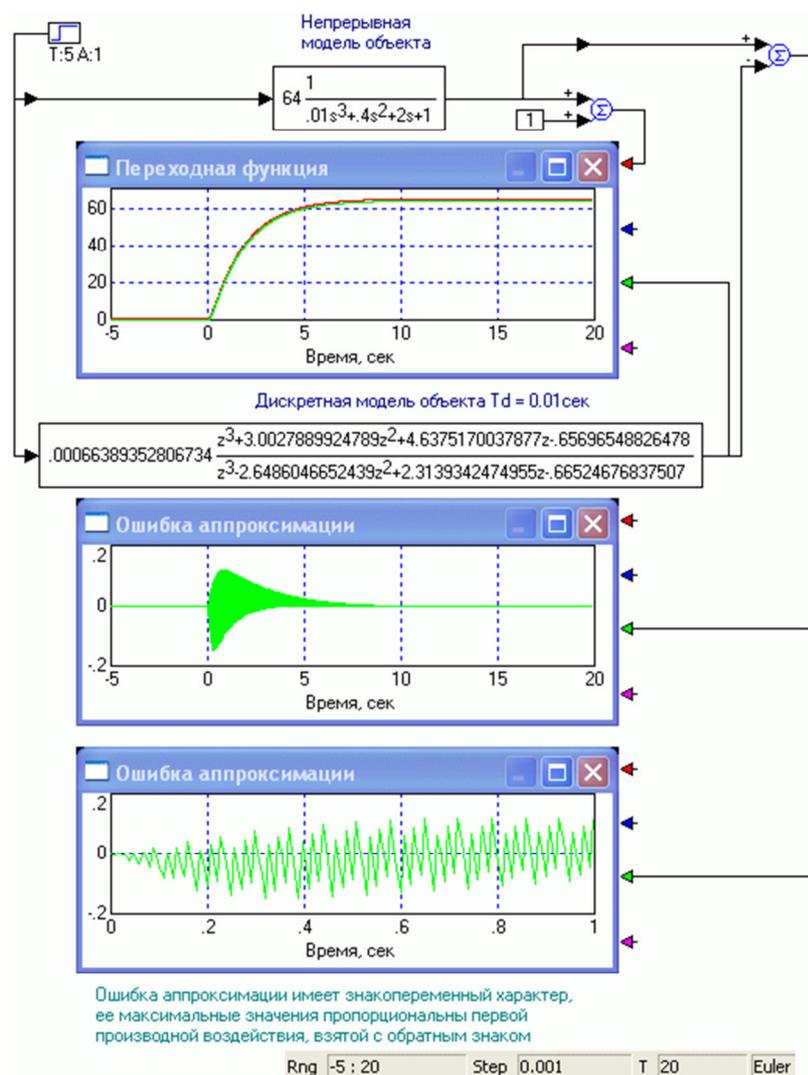


Рис. 12. Увеличение шага дискретизации приводит к увеличению величины ошибки, она приобретает знакопеременный характер

Fig. 12. An increasing sampling step leads to an increase in the error value, it acquires a sign-changing character

Заключение

Некоторые либо все элементы непрерывной САР, а также непрерывная САР полностью могут быть промоделированы дискретными моделями, которые описываются разностными, но не дифференциальными, как это происходит в непрерывных моделях, уравнениями. Практическое значение в теории управления имеет представление дискретной моделью регулятора, что позволяет получить метод цифрового изменения, который осуществляется регулятором над ошибкой регулирования, и в конечном итоге организовать дискретно-цифровое управление непрерывным объектом при

помощи цифрового микропроцессора. Дискретизацию и квантование сигнала ошибки, а также восстановление сигнала управления следует производить с подобающей точностью, которая обязана обеспечивать требуемую точность регулирования. Например, период дискретизации должен быть (по последней мере) существенно меньше большей неизменной времени объекта управления, а шаг квантования должен быть (по последней мере) меньше очень приемлемой ошибки регулирования. Уменьшение периода дискретизации и шага квантования значительно увеличивает требования к быстродействию микропроцессора.

Dorogovskoy V. A., Zinchenko A. A., Zinchenko E. G., Erofeev P. A., Mazin D. A. Optimizing digital controller of continuous object automatic control system

Список источников

1. Петров К. Э., Крючковский В. В. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания. Херсон: Олди-плюс, 2009. 294 с.
2. Жиленков А. А., Абрамкина К. В., Епифанцев И. Р., Черный С. Г. Интеллектуальное управление качеством энергии в автономных электроэнергетических системах транспортных объектов // Электротехника. 2021. № 5. С. 57–63.
3. Черный С. Г. Параметрическая идентификация компонентов интеллектуальных систем на платформе современных микроконтроллеров // Науч.-техн. информ. Сер. 2: Информационные процессы и системы. 2021. № 7. С. 19–24.
4. Черный С. Г., Доровской В. А., Новак Б. П. Концепция построения информационной подсистемы АСУ промышленным производством // Науч.-техн. информ. Сер. 2: Информационные процессы и системы. 2020. № 8. С. 20–23.
5. Tantawy A., Abdelwahed S., Abdelkarim E., Shaban K. Model-based risk assessment for cyber-physical systems security // Computers and Security. 2020. Vol. 96. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.cose.2020.101864.
6. Cook A., Janicke H., Smith R., Maglaras L. The industrial control system cyber defense triangle process // Computers and Security. 2017. Vol. 70. P. 467–481. DOI: 10.1016/j.cose.2017.07.009.
7. Chaves A., Fig. M., Dunlap S., Pecarina J. Improving the cyber resilience of industrial control systems // International journal of critical infrastructure protection. 2017. Vol. 17. P. 30–48. DOI: 10.1016/j.ijcip.2017.03.005.
8. Bolbot V., Theotokatos G., Boulougouris E., Vasalos D. A novel cyber-risk assessment method for ship systems // Safety science. 2020. Vol. 131. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104908.
9. Electromagnetic compatibility (emc). Part 4-7: Testing and measurement techniques - general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Standard IEC, 2002. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/4226> (дата обращения: 01.12.2021).
10. Zhilenkov A., Chernyi S., Nyrkov A., Sokolov S. Optimization Problem of Thermal Field on Surface of Revolving Susceptor in Vapor-Phase Epitaxy Reactor // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. P. 082060.
11. Verbytskyi I. A disturbed grid voltage interharmonic analysis with fourier series of several variables // Microsystems, electronics and acoustics. 2020. Vol. 25 (2). P. 25–32. DOI: 10.20535/2523-4455.me.208428.
12. Anant Kulkarni G., Manoj Jha, Qureshi M. F. Simulation of fault diagnosis of induction motor based on spectral analysis of stator current signal using fast fourier transform // International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology. 2014. Vol. 1. Iss. 4. P. 46789.
13. Yassa N., Rachek M., Houassine H. Motor Current Signature Analysis for the Air Gap Eccentricity Detection in the Squirrel Cage Induction Machines // Energy Procedia. 2019. Vol. 162. P. 251–262.
14. Balouji E., Salor Ö., Bäckström K., McKelvey T. Deep Learning Based Harmonics and Interharmonics Prediction Designed for Compensating Significantly Time-varying EAF Currents // IEEE Transactions on Industry Applications. 2020. Vol. 99. P. 147–159. DOI: 10.1109/TIA.2020.2976722.
15. Vyngra A., Avdeyev B. Calculation of the Load of an Electric Drive of a Reciprocating Compressor of a Ship Refrigeration Unit // IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018. P. 8602830. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602830.
16. Balouji E., Salor Ö., Ermis M. Exponential smoothing of multiple reference frame components with gpus for real-time detection of timevarying harmonics and interharmonics of eaf currents // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54. P. 6566–6575.
17. Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., Firsov A. Autonomous underwater robot fuzzy motion control system for operation under parametric uncertainties // Journal of Information Technologies and Computing Systems. 2021. № 1. С. 50–57.
18. Avdeyev B., Prosvirnin V., Dema R. Calculation of magnetic devices cleaning coolants in the agro-industrial complex // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 05003. DOI: 10.1051/mateconf/201822405003.
19. Emelianov V., Emelianova N., Zhilenkov A., Chernyi S. Application of information technologies and programming methods of embedded systems for complex intellectual analysis // Entropy. 2021. Vol. 23. N. 1. P. 1–13.

References

1. Petrov K. E., Kriuchkovskii V. V. *Komparatornaia strukturno-parametricheskaiia identifikatsiia modelei skaliarnogo mnogofaktornogo otsenivaniia* [Comparator structural-parametric identification of models of scalar multifactorial estimation]. Kherson, Oldi-plus Publ., 2009. 294 p.
2. Zhilenkov A. A., Abramkina K. V., Epifantsev I. R., Chernyi S. G. *Intellektual'noe upravlenie kachestvom energii v avtonomnykh elektroenergeticheskikh sistemakh transportnykh ob'ektov* [Intelligent energy quality control in autonomous electric power systems of transport facilities]. *Elektrotekhnik*, 2021, no. 5, pp. 57-63.
3. Chernyi S. G. *Parametricheskaiia identifikatsiia komponentov intellektual'nykh sistem na platforme sovremennykh mikrokontrollerov* [Parametric identification of components of intelligent systems on platform of modern microcontrollers]. *Nauchno-tekhnicheskaiia informatsiia. Seriia 2: Informatsionnye protsessy i sistemy*, 2021, no. 7, pp. 19-24.
4. Chernyi S. G., Dorovskoi V. A., Novak B. P. *Kontseptsiiia postroeniia informatsionnoi podsistemy ASU promyshlennym proizvodstvom* [Concept of building information subsystem for industrial production control systems]. *Nauchno-tekhnicheskaiia informatsiia. Seriia 2: Informatsionnye protsessy i sistemy*, 2020, no. 8, pp. 20-23.
5. Tantawy A., Abdelwahed S., Abdelkarim E., Shaban K. Model-based risk assessment for cyber-physical systems security. *Computers and Security*, 2020, vol. 96, pp. 1-15. DOI: 10.1016/j.cose.2020.101864.
6. Cook A., Janicke H., Smith R., Maglaras L. The industrial control system cyber defense triangle process. *Com-*

puters and Security, 2017, vol. 70, pp. 467-481. DOI: 10.1016/j.cose.2017.07.009.

7. Chaves A., Fig. M., Dunlap S., Pecarina J. Improving the cyber resilience of industrial control systems. *International journal of critical infrastructure protection*, 2017, vol. 17, pp. 30-48. DOI: 10.1016/j.ijcip.2017.03.005.

8. Bolbot V., Theotokatos G., Boulougouris E., Vasalos D. A novel cyber-risk assessment method for ship systems. *Safety science*, 2020, vol. 131, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104908.

9. *Electromagnetic compatibility (emc). Part 4-7: Testing and measurement techniques - general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. Standard IEC, 2002. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4226> (accessed: 01.12.2021).

10. Zhilenkov A., Chernyi S., Nyrkov A., Sokolov S. Optimization Problem of Thermal Field on Surface of Revolving Susceptor in Vapor-Phase Epitaxy Reactor. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, vol. 87, p. 082060.

11. Verbytskyi I. A disturbed grid voltage interharmonic analysis with fourier series of several variables. *Microsystems, electronics and acoustics*, 2020, vol. 25 (2), pp. 25-32. DOI: 10.20535/2523-4455.me.208428.

12. Anant Kulkarni G., Manoj Jha, Qureshi M. F. Simulation of fault diagnosis of induction motor based on spectral analysis of stator current signal using fast fourier transform. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 2014, vol. 1, iss. 4, p. 46789.

13. Yassa N., Rachek M., Houassine H. Motor Current Signature Analysis for the Air Gap Eccentricity Detection in

the Squirrel Cage Induction Machines. *Energy Procedia*, 2019, vol. 162, pp. 251-262.

14. Balouji E., Salor Ö., Bäckström K., McKelvey T. Deep Learning Based Harmonics and Interharmonics Pre-Detection Designed for Compensating Significantly Time-varying EAF Currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, vol. 99, pp. 147-159. DOI: 10.1109/TIA.2020.2976722.

15. Vyngra A., Avdeyev B. Calculation of the Load of an Electric Drive of a Reciprocating Compressor of a Ship Refrigeration Unit. *IEEE International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, 2018. P. 8602830. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602830.

16. Balouji E., Salor Ö., Ermis M. Exponential smoothing of multiple reference frame components with gpus for real-time detection of timevarying harmonics and interharmonics of eaf currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, vol. 54, pp. 6566-6575.

17. Zhilenkov A. A., Chernyi S. G., Firsov A. Autonomous underwater robot fuzzy motion control system for operation under parametric uncertainties. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2021, no. 1, pp. 50-57.

18. Avdeyev B., Prosvirnin V., Dema R. Calculation of magnetic devices cleaning coolants in the agro-industrial complex. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 05003. DOI: 10.1051/mateconf/201822405003.

19. Emelianov V., Emelianova N., Zhilenkov A., Chernyi S. Application of information technologies and programming methods of embedded systems for complex intellectual analysis. *Entropy*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 1-13.

Статья поступила в редакцию 01.12.2021; одобрена после рецензирования 11.01.2022; принята к публикации 25.01.2022
The article was submitted 01.12.2021; approved after reviewing 11.01.2022; accepted for publication 25.01.2022

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Алексеевич Доровской – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; 298309, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82; dora1943@mail.ru

Антон Александрович Зинченко – аспирант кафедры киберфизических систем; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3; Antel85@bk.ru

Елена Геннадьевна Зинченко – магистрант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; 298309, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82; eltel85@bk.ru

Vladimir A. Dorovskoy – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; 298309, Kerch, Ordzhonikidze St., 82; dora1943@mail.ru

Anton A. Zinchenko – Postgraduate Student of the Department of Cyber-Physical Systems; Saint-Petersburg State Marine Technical University; 190121, Saint-Petersburg, Lotsmanskaya St., 3; Antel85@bk.ru

Elena G. Zinchenko – Master's Course Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; 298309, Kerch, Ordzhonikidze St., 82; eltel85@bk.ru

Павел Андреевич Ерофеев – преподаватель кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; 298309, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82; pavel.erofeev.95@mail.ru

Pavel A. Erofeev – Lecturer of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; 298309, Kerch, Ordzhonikidze St., 82; pavel.erofeev.95@mail.ru

Дмитрий Александрович Мазин – аспирант кафедры электрооборудования судов и автоматизации производства; Керченский государственный морской технологический университет; 298309, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82; astralpolygon@yandex.ru

Dmitriy A. Mazin – Postgraduate Student of the Department of Ship Electrical Equipment and Production Automation; Kerch State Maritime Technological University; 298309, Kerch, Ordzhonikidze St., 82; astralpolygon@yandex.ru

