

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-977-988

SYNTHESIS AND SIMULATION IN THE MATLAB ENVIRONMENT OF A DISCRETE VESSEL STABILIZATION SYSTEM BASED ON BILINEAR CONVERSION

V. V. Sakharov, A. A. Chertkov, Ya. N. Kask

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A comprehensive solution to the problem of improving automation systems, which is associated with improving the accuracy, reliability and performance of the ship control system, with its sustainability on course, is becoming increasingly important in the face of the impact of the perturbations on it, causing a change in its course. One of the ways to solve the problem of ship's stabilization of the course is associated with the application of a dynamic model of the vessel, elements of which are discrete PID-regulators, allowing by variation of sampling intervals and their number to carry out the selection of the required parameters of the author's complexes, ensuring the stability of the vessel on the course. Converting the traditional PID regulator into a discrete regulator in dynamic ship systems based on bilinear w-transformation using functional modeling tools in the MATLAB environment is considered in the paper. The example of the ship's course stabilization system shows the algorithm of the synthesis of discrete regulator in the MATLAB environment and builds a generalized SIMULINK model to compare the dynamics of the processes of the ship dynamic system with continuous and digital regulators in the temporal area. The results of the simulation of the ship dynamic system show the asymptomatic convergence of the transition processes of the angular coordinates of the ship's condition at the interval of time, equal to the duration of the transition process in the system. It is shown that using SIMULINK and CONTROL TOOLBOX tools can improve the process of modeling discrete-dynamic systems at a qualitatively new level and significantly improve the efficiency of system synthesis.

Keywords: Synthesis algorithm, dynamic control system, discrete PID-regulator, comparison model, modeling, transition processes.

For citation:

Sakharov, Vladimir V., Alexandr A. Chertkov, and Yaroslav N. Kask. "Synthesis and simulation in the MATLAB environment of a discrete vessel stabilization system based on bilinear conversion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.6 (2020): 977–988. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-977-988.

УДК 681.5

СИНТЕЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ МАТЛАБ ДИСКРЕТНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ КУРСА СУДНА НА ОСНОВЕ БИЛИНЕЙНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Я. Н. Каск

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы развития и совершенствования цифровых технологий при их применении в аппаратно-программных средствах автоматизации в условиях интенсификации использования судов на качественно новом уровне, а также повышения надежности и эффективности их эксплуатации. Подчеркивается, что это возможно путем широкого внедрения для управления высокотехнологичным оборудованием и судном в целом интеллектуальных систем, а также применения технологий многоуровневой адаптации программного обеспечения в интегрированные комплексы. Показано, что цифровизация математических и физических моделей судов, получение адекватных реальным процессам решений, возможность учета широкого спектра воздействий внешней среды и условий плавания на режимы движения, вызывающих изменение курса, позволяют синтезировать судовые управляющие комплексы в классе цифровых

предиктивных систем с переходом к управлению безэкипажными объектами. В статье рассмотрен один из способов решения проблемы судовой стабилизации курса, связанный с применением динамической модели судна, элементами которой являются дискретные ПИД-регуляторы, позволяющие путем вариации интервалов дискретности и их числа осуществлять выбор требуемых параметров авторулевых комплексов, обеспечивающих устойчивость судна на курсе. Предложены модель и алгоритм преобразования традиционного ПИД-регулятора в дискретный регулятор в динамических судовых системах на основе билинейного w-преобразования с использованием функциональных средств моделирования в среде MATLAB. Обобщенная модель дискретной системы стабилизации судна на курсе построена в пакете SIMULINK. Приведен алгоритм синтеза дискретного регулятора. На примере рассмотрены преимущества цифровой системы по сравнению с непрерывной. Показано, что помощью инструментальных средств пакетов SIMULINK и CONTROL TOOLBOX можно на качественно новом уровне совершенствовать процесс моделирования дискретно-динамических систем.

Ключевые слова: алгоритм синтеза, динамическая система управления, дискретный ПИД-регулятор, модель сравнения, моделирование, переходные процессы.

Для цитирования:

Сахаров В. В. Синтез и моделирование в среде MATLAB дискретной системы стабилизации курса судна на основе билинейного преобразования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, Я. Н. Каск // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 6. — С. 977–988. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-6-977-988.

Введение (Introduction)

Современный подход к решению задач управления сложными динамическими объектами базируется на использовании цифровых технологий и инструментов построения интеллектуальных систем. Искусственные нейронные сети, средства ANFIS и аппарат нечеткой логики позволяют на качественно новом уровне решать проблемы управления плохо формализуемыми динамическими объектами высокой размерности. При этом применение искусственных нейронных сетей в задачах синтеза таких систем ограничивается наличием существенного недостатка, связанного со сложностью процесса обучения, требующего большого объема экспериментальных данных об объекте управления [1]–[3]. В то же время средствами аппарата нечеткой логики разрозненным и «размытым» понятиям и связям в результате их формализации присваивается смысловое значение, отражающее закономерности управления сложными нелинейными динамическими объектами и их показатели качества. Однако лучшие из известных нечетких систем, такие как Сугено и Мамдани [4]–[6], не обеспечивают одновременную реализацию таких качеств, как высокая производительность, несложность процедур обучения и их оптимальность в глобальном смысле. В связи с этими недостатками проблемы методологии применения нейросетевых и нечетких моделей при синтезе оптимальных систем автоматического управления сохраняются.

Одним из средств качественной формализации процедуры синтеза сложного объекта могут служить цифровые технологии, способные свести эту процедуру к относительно простым правилам. Использование нейронных сетей обеспечивает адаптацию к условиям функционирования, а совместное использование цифровых технологий и искусственных нейронных сетей позволяет системно решать комплекс задач численной оптимизации и накопления информации о текущем состоянии объектов [7], [8].

Платформа цифровизации технологических процессов отвечает в полной мере концепции интегрированных систем управления. Судовые интегрированные системы в классе интеллектуальных систем выполняют функции управления, измерения, диагностирования, синхронизации работы подсистем, визуализации рабочих режимов, обеспечивая обмен информацией в среде пользователей на всех иерархических уровнях с выходом в интернет.

Одним из важных приложений в концепции интегрированных систем управления может служить решение проблемы судовой стабилизации курса с использованием цифровых технологий. В частности, предложено применение цифровых технологий, реализуемых на основе билинейного преобразования, к динамической модели судовой системы стабилизации курса при переоборудовании непрерывных ПИД-регуляторов [9], [10] в дискретные ПИД-регуляторы, что позволит путем вариации интервалов дискретности и их числа осуществлять выбор требуемых параметров авторулевых комплексов, обеспечивающих устойчивость судна на курсе.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Покажем возможность решения задачи стабилизации судна на курсе цифровыми средствами, реализуемыми с помощью инструментария пакетов SIMULINK и CONTROL TOOLBOX системы MATLAB [11], [13] на примере линейной математической модели рыскания судна, заданной в пространстве состояний дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= \omega_y; \\ \dot{\omega}_y &= -\frac{1}{T_s} \omega_y + \frac{K_s}{T_s} \delta,\end{aligned}$$

где φ — угол рыскания (угол отклонения от заданного курса); ω_y — угловая скорость вращения вокруг вертикальной оси; δ — угол поворота вертикального руля относительно положения равновесия; T_s — постоянная времени; K_s — постоянный коэффициент, имеющий размерность с^{-1} .

Передаточная функция объекта управления (от угла поворота руля к углу рыскания) запишется в виде

$$F(s) = \frac{K_s}{s(T_s + 1)}. \quad (1)$$

В работе исследуется модель судна-контейнеровоза при $T_s = 18,2 \text{ с}$, $K = 0,0694 \text{ с}^{-1}$.

Привод (рулевая машина) приближенно моделируется звеном первого порядка:

$$R(s) = \frac{K_R}{(T_R s + 1)}, \quad (2)$$

с параметрами $T_R = 2 \text{ с}$, $K_R = 1$.

Для измерения угла рыскания используется гироскопас, математическая модель которого записывается в виде аperiodического звена первого порядка с передаточной функцией

$$G(s) = \frac{K_g}{(T_g s + 1)}, \quad (3)$$

где $T_g = 6 \text{ с}$, $K_g = 1$ для данной системы.

Структурная схема системы стабилизации представлена на рис. 1.

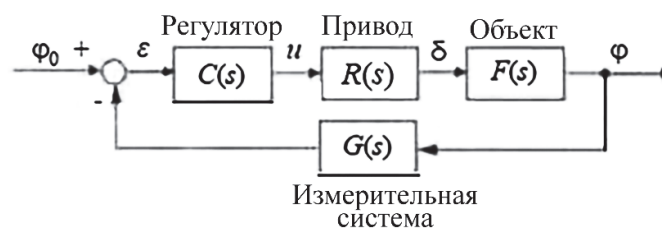


Рис. 1. Структурная схема системы стабилизации судна

Эффективность и качество функционирования системы управления и стабилизации судна на курсе во многом определяются корректностью выбора параметров регуляторов. К наиболее распространенным типам регуляторов относятся ПИД-регуляторы [10], содержащие в своей структуре пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие сигналов, которые задаются путем выбора постоянных коэффициентов, соответствующих этим составляющим. Функциональное исполнение ПИД-регуляторов таково, что блоки, генерирующие сигналы, соединены параллельно. Это позволяет оценивать влияние каждой составляющей на динамику системы как отдельно, так и в совокупности, что упрощает процесс настройки регуляторов в производственных условиях.

Вместе с тем проблема применения ПИД-регуляторов продолжает привлекать к себе большое внимание. Причина состоит в возникающих трудностях, возникающих при управлении нелинейными

системами, объектами с транспортным запаздыванием в случаях появления шумов при измерениях переменных состояния и выхода, а также при наличии неполной информации о динамике технологических процессов в нестационарных условиях эксплуатации [14], [15]. Во многих ситуациях настройка параметров регуляторов выполняется путем визуальной оценки переходных процессов, без комплексных количественных оценок с применением компьютерных технологий и спектрального анализа.

В исходной модели судна используется непрерывный пропорционально интегрально-дифференциальный ПИД-регулятор, описываемый передаточной функцией с параметрами:

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T_V s} \right); \quad (4)$$

$$K_c = 0,8; T_I = 1000 \text{ с}; T_D = T_s = 18,2 \text{ с}; T_V = 1 \text{ с}.$$

На первом этапе синтеза необходимо построить модель непрерывной системы в среде MATLAB/SIMULINK и получить переходный процесс в непрерывной системе при изменении курса на 10° . На втором этапе выполняется переоборудование непрерывного регулятора в цифровой с помощью билинейного, или w -преобразования, реализуемого непосредственно и с помощью преобразования Тастина, имеющего вид

$$w = \frac{2}{T} \cdot \frac{z-1}{z+1}, \quad (5)$$

где T — интервал квантования.

Далее выбирается $T = 1$ с и строится дискретная динамическая модель цифровой системы в среде MATLAB / SIMULINK, позволяющая получить и сравнить переходные процессы в непрерывной и цифровой системах при изменении курса на те же 10° . В дальнейшем эту процедуру нужно повторить для интервала квантования $T = 5$ с, чтобы объяснить эффекты, наблюдающиеся при увеличении интервала квантования. Причем для последнего варианта можно рассчитать перерегулирование и время переходного процесса.

С целью построения непрерывной и дискретной моделей системы стабилизации в среде SIMULINK и исследования их переходных процессов составлен скрипт-файл `digsys1.m` с исходными данными и передаточными функциями каждого из блоков, входящих в систему. Пример первого блока программы с комментариями:

```
%Файл "digsys1.m"
%Структура непрерывной системы стабилизации судна
%Модель судна-контейнеровоза
Ts=18.2;
Ks=0.0694;
F=tf(K,[Ts 1 0])
[nF, dF]=tfdata(F,'v').
```

В первых трех строках операторов этого блока задаются параметры T_s и K_s модели (1) самого судна-контейнеровоза, выраженной ее передаточной функцией $F(s)$. Последняя строка означает, что числитель и знаменатель скалярной передаточной функции $F(s)$ будут записаны в полиномы nF и dF , используемые для ввода в блок параметров SIMULINK-модели судна-контейнеровоза. Результатом исполнения этих операторов является следующее решение:

```
F =
    0.0694
-----
    18.2 s^2 + s
Continuous-time transfer function.
nF =
```

0 0 0.0694

dF =

18.2000 1.0000 0.

Аналогично в файле программы представлены остальные блоки системы стабилизации судна. В результате для модели привода рулевой машины, с учетом соотношения (2), в командном окне MATLAB получим следующее решение:

R =

1

2 s + 1

Continuous-time transfer function.

nR =

0 1

dR =

2 1

Для блока параметров модели измерительной системы (гироскопа) с передаточной функцией (3) решением будет следующее:

G =

1

6 s + 1

Continuous-time transfer function.

nG =

0 1

dG =

6 1

Блок параметров непрерывного ПИД-регулятора с передаточной функцией (4) в программе будет представлен в следующем виде:

```
%Модель непрерывного (ПИД) регулятора
Kc=0.8;
Ti=1000;
Td=18.2;
Tv=1;
C=tf([Kc*(Ti*Tv+Ti*Td) Kc*(Ti+Tv) Kc],[Ti*Tv Ti 0])
[nC, dC]=tfdata(C,'v')
```

Результатом выполнения этих операторов в командном окне MATLAB будет следующее решение:

C =

15360 s^2 + 800.8 s + 0.8

1000 s^2 + 1000 s

Continuous-time transfer function.

nC =
1.0e+04 *
1.5360 0.0801 0.0001

dC =
1000 1000 0

Таким образом, после запуска скрипт-файла в командном окне MATLAB получим необходимые результаты для использования их в качестве параметров непрерывной SIMULINK-модели всей системы стабилизации курса судна-контейнеровоза.

Далее переходим к работе с приложением SIMULINK среды MATLAB. Запустив пакет SIMULINK, вызываем из его интерфейса окно новой модели, используя меню **Blank Model**. Затем, выбирая группу элементов **Continuous** в окне **SIMULINK Library Browser**, перетаскиваем в окно новой модели элементы **Transfer Fcn** (передаточная функция) в качестве функциональных блоков исследуемой схемы (см. рис. 1). Поскольку полиномы числителя и знаменателя передаточных функций заданы в командном окне среды MATLAB, выполнив двойной щелчок мышью по каждому из блоков SIMULINK-модели, вводим в блок их параметров **nF** в поле **Numerator** и **dF** в поле **Denominator**.

Щелкнув на каждом блоке левой кнопкой мыши, изменяем его название в соответствии с названием, принятым на структурной схеме системы (см. рис. 1). Для того чтобы смоделировать ступенчатый входной сигнал, перетаскиваем блок **Sources** — **Step** из окна **Simulink Library Browser** в окно модели. Сделав двойной щелчок мышью по этому блоку, вводим 0 в поле **Step time** и $10 \cdot \pi / 180$ в поле **Final value** (изменение курса на 10°).

Для создания суммирующего элемента перетаскиваем блок **Math operation** — **Sum** из окна **Simulink Library Browser** в окно модели. Сделав двойной щелчок мышью по этому блоку, вводим $+$ в поле **List of signs** (второй вход — отрицательная обратная связь).

Для того чтобы на выходе получить значения угла рыскания и угла перекладки руля в градусах, добавим в модель два блока-усилителя (**Math operations** — **Gain**). Для каждого из них устанавливаем (щелкнув дважды по блоку) коэффициент усиления $180/\pi$.

Для получения графиков изменения угла рыскания и угла перекладки руля добавляем в модель два блока-осциллографа: **Sinks** — **Scope**. Соединив нужные входы и выходы блоков, получаем схему (рис. 2) системы стабилизации курса судна, представляющей SIMULINK-модель.

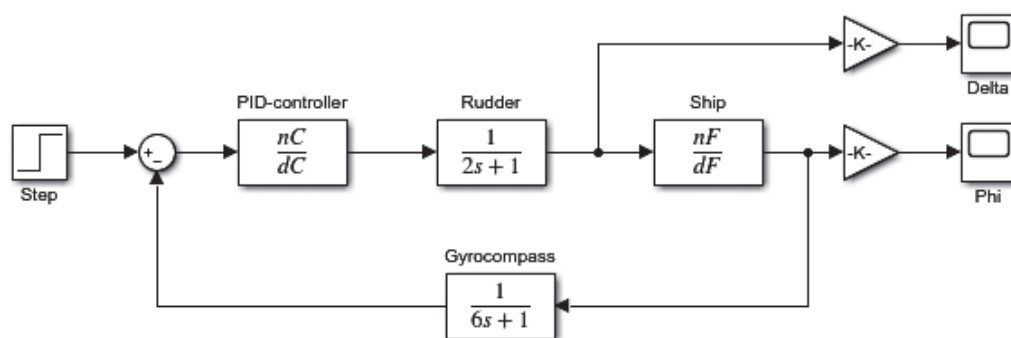


Рис. 2. SIMULINK-модель системы стабилизации судна с непрерывным регулятором

В завершение первого этапа исследуем динамику построенной SIMULINK-модели, выбрав в пункте меню модели **Simulation Model Configuration Parameters** для параметра **Stop time** значение 150, соответствующее времени моделирования 150 с. Процесс моделирования начинается с нажатия кнопки ► или вызова меню **Simulation** — **Run**.

Графики переходных процессов по параметрам δ и φ представлены, соответственно, в окнах **Phi** (рис. 3, а) и **Delta** (рис. 3, б) блоков **Scope**.

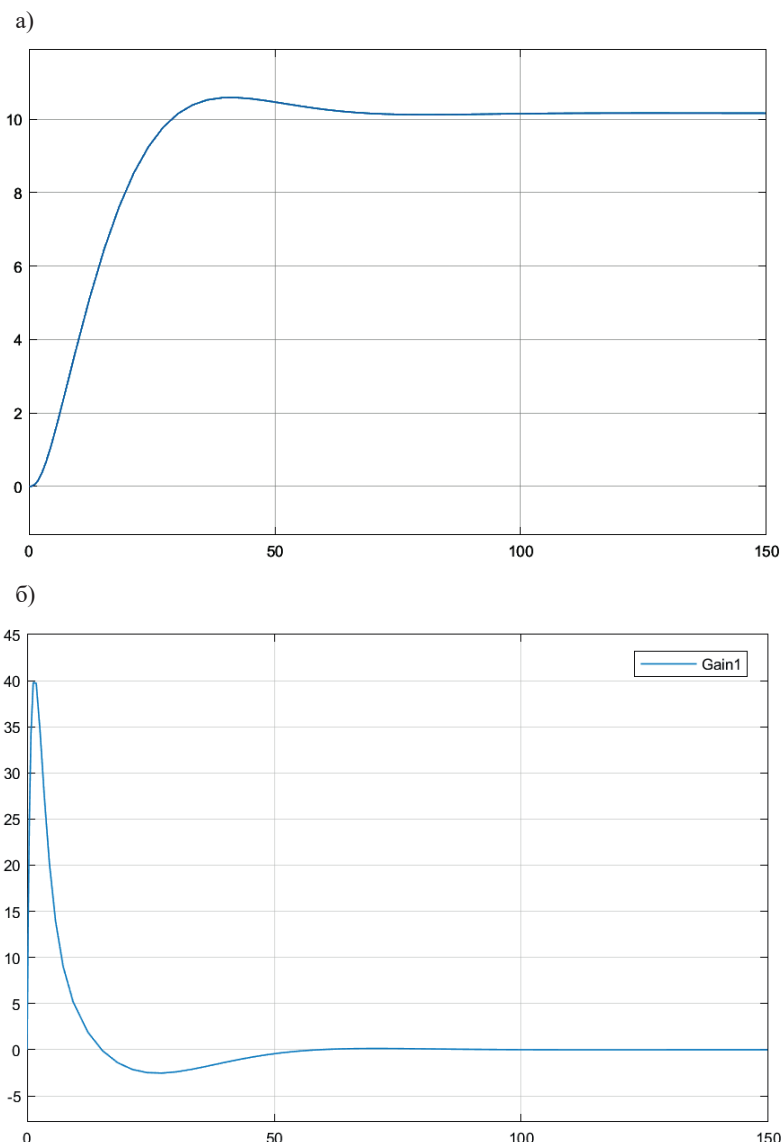


Рис. 3. Графики переходных процессов:
а — при изменении угла рыскания φ ; б — при изменении угла поворота руля

Результаты (Results)

На втором этапе синтеза непрерывная динамическая система стабилизации преобразуется в дискретную систему путем преобразования непрерывного ПИД-регулятора в дискретный ПИД-регулятор. С этой целью используется билинейное преобразование, в котором связь дискретной переменной z с непрерывной (комплексной) переменной w описывается формулой

$$z = e^{sT_s} \approx \frac{1 + w(T_w / 2)}{1 - w(T_w / 2)}.$$

Такое преобразование позволяет избежать применения конформного преобразования $z = e^{sT}$, при котором характеристическое уравнение $a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} = 0$ станет трансцендентным. Таким образом, имеем эквивалентное преобразование $H(z) = H(w)$, где $w = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1}$.

В среде MATLAB для перехода от непрерывной модели к дискретной по методу Тастина также используется стандартный оператор `c2d`, в который добавлен дополнительный строковый аргумент **Tustin**. С учетом этого фрагмент скрипт-файла, позволяющий построить с помощью преобразования Тастина (5) дискретный регулятор C_d , будет состоять из команд:

```
T = 1;
Cd = c2d(C, T, 'tustin');
[nCd, dCd] = tfdata(Cd, 'v').
```

Первая из них определяет интервал квантования (1 с), вторая строит дискретный регулятор Cd по передаточной функции C непрерывного регулятора с помощью преобразования Тастина, Cd =

$$\frac{10.51 z^2 - 20.48 z + 9.973}{z^2 - 1.333 z + 0.3333}$$

Sample time: 1 seconds

Discrete-time transfer function,

а третья выделяет числитель и знаменатель передаточной функции Cd:

```
nCd =
    10.5071   -20.4797    9.9732

dCd =
    1.0000   -1.3333    0.3333.
```

Аналогичный результат можно получить путем непосредственного использования билинейного преобразования:

$$H(z) = H(w), \quad w = 2 * F_w * (z - 1) / (z + 1),$$

с помощью команды [NUMd, DENd] = bilinear(NUM, DEN, Fw), где NUM и DEN — векторы строк, содержащих коэффициенты функции числителя NUM(s) и знаменателя DEN(s) от переменной s, которые трансформируются в коэффициенты z-transform NUMd(z)/DENd(z); $F_w = 1/T_w$ — частота дискретизации.

Покажем тождественность преобразования для рассматриваемого дискретного регулятора по известной его непрерывной передаточной функции:

```
[nC,dC]=tfdata(C,'v')

nC =
    1.0e+04 *
    1.5360    0.0801    0.0001

dC =
    1000    1000    0

T=1;

[NUMd,DENd] = bilinear(nC,dC,1/T)
NUMd =
    10.5071   -20.4797    9.9732

DENd =
    1.0000   -1.3333    0.3333.
```

Обсуждение (Discussion)

Для моделирования цифровой системы управления [14] необходимо построить SIMULINK-модель, сравнив ее с исходной непрерывной моделью. В связи с этим необходимо объединить непрерывную и цифровую модели в одной схеме, в которой будут предусмотрены два блока **Scope**, на каждый из которых (через мультиплексоры) будут поступать два идентичных сигнала (δ или φ) от непрерывной и цифровой систем. С этой целью в модель (см. рис. 2) добавлен второй замкнутый контур

в составе элементов исходной схемы, представляющий параллельную ветвь относительно первого замкнутого контура.

В полученной модели удаляется блок, соответствующий непрерывному регулятору и на его место устанавливается блок **Discrete Transfer Fcn** из группы **Discrete**. Выполнив двойной щелчок мышью по этому блоку, вводим **nCd** поле **Numerator**, **dCd** поле **Denominator** и **T** поле **Sample time**. После этого на вход одного мультиплексора подаются сигналы выхода непрерывной и цифровой систем (углы рыскания), а на входы второго — сигналы управления (углы поворота руля). Выходы мультиплексора соединяются со входами усилителей перед блоками-осциллографами. Построенная таким образом обобщенная SIMULINK-модель, которая служит для сравнения двух параллельно соединенных непрерывной и цифровой систем, представлена на рис. 4.

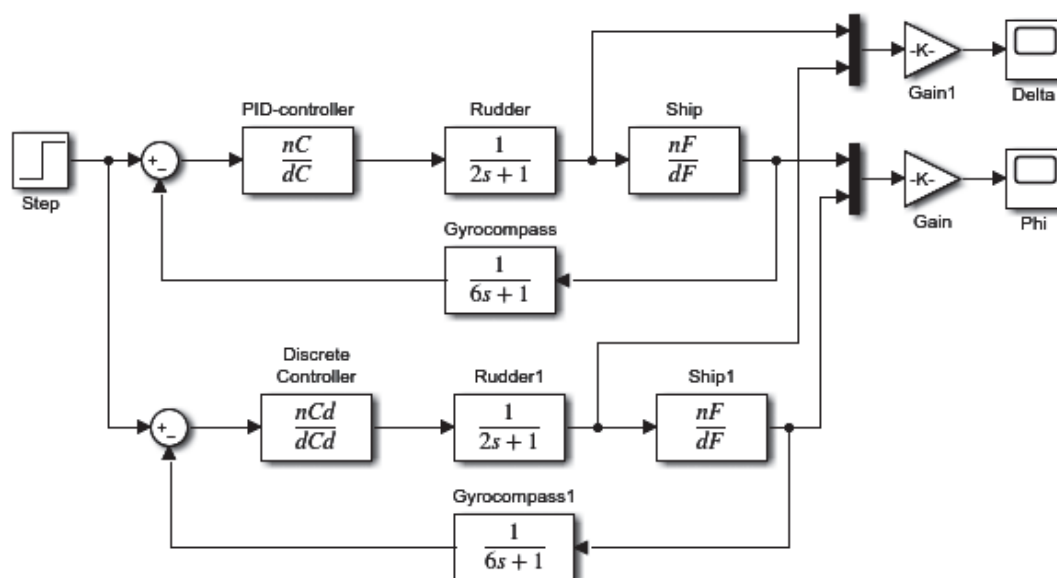


Рис. 4. Модель для сравнения непрерывной и цифровой систем

Результаты моделирования системы обобщенной SIMULINK-модели сравнения представлены в каждом окне осциллографов в виде двух графиков переходных процессов: по углу рыскания (рис. 5, а) и по углу поворота руля (рис. 5, б).

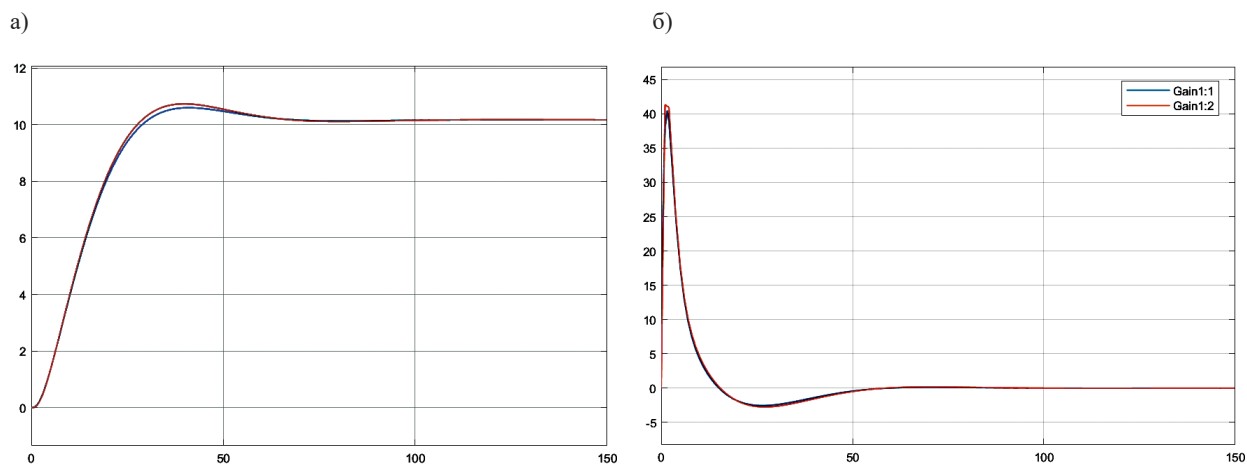


Рис. 5. Графики переходных процессов:
а — при изменении угла рыскания; б — при изменении угла поворота руля

В каждом окне эти графики выделены разными цветами, один из которых (красный) принадлежит непрерывной системе, другой (синий) — цифровой системе.

Заключение (Conclusion)

Произведено моделирование динамики системы с аналоговым и цифровым регуляторами при входном сигнале в форме прямоугольного импульса. С этой целью векторы начальных условий регуляторов заданы так, чтобы показать асимптотическую сходимость переходных процессов угловых координат состояния судна через интервал времени, равный длительности переходного процесса в системе. Это позволяет получить численную оценку времени переходного процесса в системе стабилизации курса судна. Для модели судна с заданной структурой использование метода билинейной дискретизации применительно к синтезу цифрового ПИД-регулятора и его реализации в MATLAB позволяет путем несложных вычислительных процедур управлять динамическими составляющими движения судна при изменении его курса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дерябин В. В. Использование нейронных сетей для стабилизации судна на траектории / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.
2. Лукашкин Г. Е. Построение системы автономного адаптивного управления судном на основе нечеткой логики / Г. Е. Лукашкин // Транспортное дело России. — 2019. — № 5. — С. 177–180.
3. Шведов А. С. Нечеткое математическое программирование: краткий обзор / А. С. Шведов // Проблемы управления. — 2017. — № 3. — С. 2–10.
4. Никитин Е. Д. Анализ и структура систем динамического позиционирования судов / Е. Д. Никитин [и др.] // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2017. — № 3 (21). — С. 85–90.
5. Жеребцов В. М. Системы автоматического управления движением судна / В. М. Жеребцов, Д. П. Клепач // Новая наука: современное состояние и пути развития. — 2016. — № 11–2. — С. 159–162.
6. Сахаров В. В. Алгоритмизация и синтез систем управления судовыми динамическими объектами средствами математического программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.
7. Powell J. Da. Feedback Control of Dynamic Systems / J. Da Powell, G. F. Franklin. — 7th Edition. — Pearson, 2014. — 880 p.
8. Sivanandam S. N. Introduction to fuzzy logic using Matlab / S. N. Sivanandam, S. Sumathi, S. N. Deepa. — Berlin: Springer, 2007. — 430 p.
9. Гриняк В. М. Управление движением судна по программной траектории при параметрической неопределенности с использованием ПИД-регулятора / В. М. Гриняк, С. С. Пашин // Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 102–112.
10. Чертков А. А. Параметрическая настройка ПИД-регуляторов динамических систем средствами MATLAB / А. А. Чертков, Д. С. Тормашев, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 164–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-5-164-171.
11. Comasòlivas R. Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications / R. Comasòlivas, T. Escobet, J. Quevedo // IFAC Proceedings Volumes. — 2012. — Vol. 45. — Is. 3. — Pp. 715–720. DOI: 10.3182/20120328-3-IT-3014.00121.
12. Rajvanshi S. Performance evaluation of various controllers designed for an industrial first order plus delay process / S. Rajvanshi, P. Juneja // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. — 2013. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 1307–1311.
13. Усков А. А. Системы с нечеткими моделями объектов управления: монография / А. А. Усков. — Смоленск: СФРУК, 2013. — 153 с.
14. Черных И. В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных; под общ. ред. В. Г. Потемкина. — М.: ДИАЛНОГ-МИФИ, 2004. — 491 с.
15. Гудвин Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. — М.: Бином, 2004. — 911 с.

REFERENCE

1. Deryabin, Victor V. "Neural networks implementation for a vessel track control." *Vestnik Gosudarstvenno-go universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.
2. Lukashkin, G. "Building a system of autonomous adaptive control of the vessel based on fuzzy logic." *Transport business of Russia* 5 (2019): 177–180.
3. Shvedov, A. S. "Nechetkoe matematicheskoe programmirovaniye: kratkii obzor." *Problemy upravleniya* 3 (2017): 2–10.
4. Nikitin, E. D., T. V. Timochkina, V. A. Miklush, and N. V. Yagotintseva. "Analysis and structure of dynamic positioning systems for ships." *Informatsionnye tehnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo* 3(21) (2017): 85–90.
5. Zherebtsov, V. M., and D. P. Klepach. "Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna." *Novaya nauka: sovremennoe sostoyaniye i puti razvitiya* 11–2 (2016): 159–162.
6. Saharov, Vladimir V., Alexander A. Chertkov, and Sergey B. Saburov. "Algorithmic and synthesis of control systems of ship dynamic objects by means of mathematical programming." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.
7. Powell, J. Da, and Gene F. Franklin. *Feedback Control of Dynamic Systems*. 7th edition. Pearson, 2014.
8. Sivanandam, S. N., S. Sumathi, and S. N. Deepa. *Introduction to fuzzy logic using Matlab*. Berlin: Springer, 2007.
9. Grinyak, V. M., and S. S. Pashin. "Upravlenie dvizheniem sudna po programmnoi traektorii pri parametricheskoi neopredelennosti s ispol'zovaniem PID-regulyatora." *Vestnik Vladivostskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa* 11.2 (2019): 102–112.
10. Chertkov, Alexander A., Dmitry S. Tormashov, and Sergei V. Saburov. "Dynamic systems parametric arrange by means PID tuner in MATLAB." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 164–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-5-164-171.
11. Comasòlivas, R., T. Escobet, and J. Quevedo. "Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications." *IFAC Proceedings Volumes* 45.3 (2012): 715–720. DOI: 10.3182/20120328-3-IT-3014.00121.
12. Rajvanshi, Saurabh, and Pradeep Juneja. "Performance evaluation of various controllers designed for an industrial first order plus delay process." *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 2.4 (2013): 1307–1311.
13. Uskov, A. A. *Sistemy s nechetkimi modelyami ob'ektoy upravleniya. Monografiya*. Smolensk: SFRUK, 2013.
14. Chernykh, I. V. *SIMULINK: sreda sozdaniya inzhenernykh prilozhenii*. Edited by V. G. Potemkin. M.: DIALNOG-MIFI, 2004.
15. Gudvin, G. K., S. F. Grebe, and M. E. Sal'gado. *Proektirovaniye sistem upravleniya*. M.: Binom, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: _saharov_@rambler.ru,
SaharovVV@gumrf.ru

Чертков Александр Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov, Vladimir V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: _saharov_@rambler.ru,
SaharovVV@gumrf.ru

Chertkov, Alexandr A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: chertkov51@mail.ru,
kaf_electricautomatic@gumrf.ru

Каск Ярослав Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru

Kask, Yaroslav N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: rgam2010@yandex.ru,
kaf_electricalautomatic@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 4 ноября 2020 г.
Received: November 4, 2020.*