

4. Dremlyug V.V., SHifrin L.S. Navigacionnaya gidrometeorologiya: Uchebnik dlya VUZov morskogo transporta. Izdanie 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe. – Moskva: "Transport", 1978. – 304s.
5. Spravochnik po navigacionnoj meteorologii / Stekhnovskij D.I., Vasil'ev K.P. – M.: Transport, 1976.
6. Tul'chinskij YU.I. Razrabotka kompleksnoj modeli prognoza i analiza povedeniya sudna na volnii: Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. – Novorossijsk: NGMA, 2003. – 24s.
7. GMK (gidrometeorologicheskaya karta № 6416). – GUNiO MO, 1980.
8. Tajfun Hagibis, [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [https://wikichi.ru/wiki/Typhoon\\_Hagibis](https://wikichi.ru/wiki/Typhoon_Hagibis), svobodnyj zagolovok s ekrana.
9. Pershina L.A., Astreina L.B. Vybor marshruta sudna na osnove pogodnyh uslovij//Eksploatsiya morskogo transporta.– №2 (91), - S.30-39
10. Astreina L.B., Kondrat'ev S.I., SHtyrhunova N.A., Murasin M.M. Novorossijskaya bora i avarijnye situacii s sudami vo vremya ee dejstviya//Eksploatsiya morskogo transporta.– 2021.– № 3 (100).– S. 60-67.
11. Astreina L.B., Pershina L.A. Natural causes of ship accidents in the Bermuda region on the example of the el faro ship v sbornike: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021 International Symposium "Earth Sciences: History, Contemporary Issues and Prospects, ESHCIP 2021". IOP Publishing Ltd, 2021. S. 012018.
12. Astrein V.V., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L. Metodologicheskie osnovy raspredelennoj avtomatizirovannoj sistemy upravleniya bezopasnost'yu sudovozhdeniy a// Eksploatsiya morskogo transporta. 2020. № 3 (96). S. 59-64.

УДК: 656.61.052.4

DOI: 10.34046/aumsuomt 103/4

## ДИСКРЕТНАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОМ ДВИЖЕНИЯ СУДНА С ПРОГНОЗИРУЮЩЕЙ МОДЕЛЬЮ НА ОСНОВЕ MPC-РЕГУЛЯТОРА

*А.Н. Штанько, аспирант*

*А.С. Васьков, доктор технических наук, профессор*

Показан способ построения дискретной адаптивной системы управления параметром движения судна с прогнозирующей моделью на основе MPC-регулятора с использованием экспериментальных данных. При моделировании в структуру допустимого множества программных управлений были введены ограничения на управляющие и контролируемые переменные. Снижение вычислительных затрат и нагрузки на управляющее устройство достигается скольжением контрольным сигналом в системе, являющимся мерой адекватности прогнозных и фактически наблюдаемых данных.

**Ключевые слова:** маневрирование судна, программное управление, адаптация, MPC-регулятор, параметр адаптации, метод Тригга-Лича, скользящий контрольный сигнал.

## DISCRETE ADAPTIVE VESSEL MOTION PARAMETER CONTROL SYSTEM WITH PREDICTIVE MODEL BASED ON MPC CONTROLLER

*A.N. Shtanko, A.S. Vaskov*

A method of constructing a discrete adaptive control system for the vessel motion parameter with a predictive model based on an MPC controller using experimental data is shown. When modeling, restrictions on control and controlled variables were introduced into the structure of an acceptable set of program controls. The reduction of computational costs and the load on the control device is achieved by a sliding control signal in the system, which is a measure of the adequacy of the forecast and actually observed data.

**Keywords:** ship maneuvering, program control, adaptation, MPC controller, adaptation parameter, Trigg-Lich method, sliding control signal.

Оптимизация и адаптация системы управления к постоянно изменяющимся условиям плавания и состояниям судна является одной из важнейших задач обеспечения безопасности судовождения. В промышленных приложениях для решения этих задач набирает популярность метод управления с прогнозирующей моделью (Model Predictive Control – MPC) [7]. Основной особенностью управ-

ления с помощью MPC-регулятора является наличие математической модели объекта, которая достаточно точно описывает его поведение.

Целью исследования является реализация классической схемы MPC управления с прогнозом, включенным в контур обратной связи, для судна длиной 62,5 м, водоизмещением 630 тонн.

Динамическая модель прогнозирования уг-

ловой скорости судна построена по экспериментальным данным путем ее описания через переменные состояния в дискретной форме

$$\begin{aligned} x(t + T_s) &= Ax(t) + Bu(t) + Ze(t); \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + e(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $t, T_s$  – текущий момент времени и период дискретности;

$x \in \mathbb{R}^n$  – вектор состояния, принадлежащий множеству  $\mathbb{R}^n$ ;

$x(t), e(t)$  – начальное состояние и погрешность системы;

$u \in \mathbb{R}^m$  – вход системы (управление), принадлежащий множеству  $\mathbb{R}^m$ ;

$y \in \mathbb{R}^p$  – выход системы, принадлежащий множеству  $\mathbb{R}^p$ ;

$n, m, p$  – размерность множеств;

$A, B, C, D, Z$  – матрицы состояния, управления, выхода, измеряемого входа, погрешностей соответствующей размерности.

Параметры модели по результатам идентификации [10]:

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0,7488 & 0,1313 & 0,01109 & 0,004311 \\ 0,3057 & 0,5785 & -0,4869 & -0,01523 \\ 0,0858 & -0,1686 & 0,2392 & 0,8227 \\ 0,006138 & -0,0111 & -0,5729 & 0,5768 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0,01392 \\ -0,03871 \\ -0,01463 \\ -0,01824 \end{bmatrix}, \\ C &= [146,5 \quad 6,818 \quad -2,484 \quad 0,4957], \\ D &= 0, \\ Z &= \begin{bmatrix} 0,006434 \\ 0,03156 \\ 0,001706 \\ -0,002866 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Структурная схема предлагаемой системы автоматического управления с MPC регулятором представлена основными блоками на рис. 1.

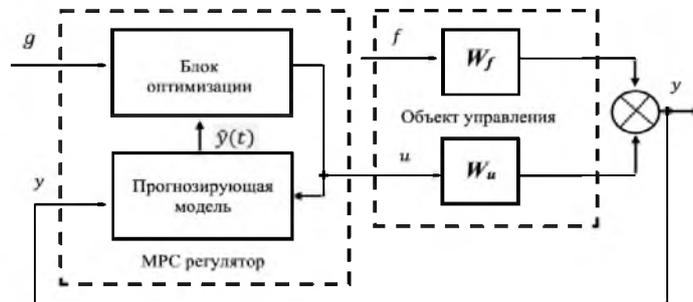


Рисунок 1 – Структурная схема системы автоматического управления с MPC регулятором;  $W_f, W_u$  – передаточные функции объекта по возмущению и управлению;  $g$  – параметры оптимизации

На основании работ [7] реализация классической схемы MPC управления с прогнозом, включенным в контур обратной связи, сводится к следующим принципам:

1. Осуществляется измерение выходного вектора ( $y_i[k]$ ) и сравнение его с прогнозируемым значением ( $\hat{y}_i[k]$ ).

2. Решается оптимизационная задача, обеспечивающая в дискретные моменты времени минимум или максимум выбранного критерия эффективности. Если критерий имеет линейную форму, то используется метод линейного программирования, если критерий задан в квадратичной форме – метод квадратичного программирования. В частном случае целесообразно применить критерий обобщенной работы управляющих воздействий на интервале  $P-1$ , предложенный академиком А.А.Красовским [5]:

$$\begin{aligned} J_k(u[k], u[k+1], \dots, u[k+P-1]) \\ \rightarrow \min_{(u[k], u[k+1], \dots, u[k+P-1])^T \in \Omega} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $P$  – интервал прогноза;

$k$  – номер такта управления;

$T$  – период функционирования системы;

$\Omega$  – невыпуклое допустимое множество управляющих воздействий.

3. Из найденной в результате решения задачи оптимальной последовательности (2) используется только первый вектор ( $u^*[k]$ ) в качестве управления на следующем такте (с момента времени  $k+1$  до момента  $k+2$ ). Такой подход позволяет внести в модель последующие корректировки смещения по результатам измеренного выхода ( $y[k+1]$ ).

4. Для следующего такта, начиная с момента времени  $k+1$ , все операции, указанные в пунктах 1 – 3 повторяются заново. В исследовании [1] доказано, что потактовый прогноз, управление и корректировка модели позволяет нелинейные процессы управления и движения судна заменить кусочно-линейными с помощью простых линейных моделей.

Система управления (см. рис.1), реализована в MATLAB/Simulink.

Исходные результаты моделирования без оптимизации показывают существенное отклонение кривой прогноза от соответствующей кривой реального процесса изменения угловой скорости при движении судна рис. 2. Это обусловлено тем, что модель (1) не учитывает внешние значительные ветровые и волновые воздействия на судно.

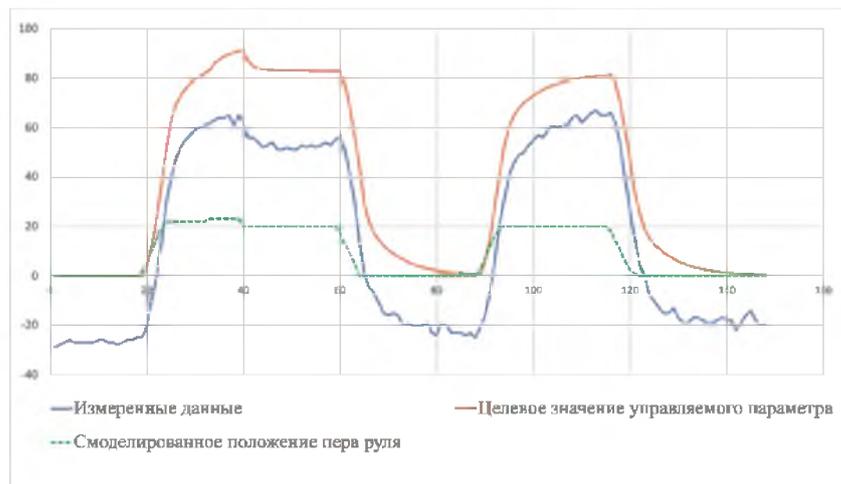


Рисунок 2 – Прогнозируемая и наблюдаемая угловая скорость судна

Однако, на основании программной траектории движения судна можно сформулировать целевое значение управляемого параметра ( $\mathcal{Y}$ ) и соответствующее ему целевое управление ( $u$ ).

Для реализации управления судном в режиме реального времени необходимо, чтобы решение оптимизационной задачи выполнялось достаточно быстро, в пределах одного такта. Это требование значительно осложняет внедрение прогнозирующих моделей в практику управления малоинерционными динамическими объектами. Поэтому предлагается использовать различную длительность тактов управления, прогноза и оптимизации.

Длину горизонта прогноза в непрерывном времени можно выразить через период дискретности, т.е. дискретный горизонт прогноза и размерность задачи оптимизации (2) ( $mP$ )

$$P_T = PT_s,$$

где  $P_T$  – длина горизонта прогноза.

На основании методологии [3, 7] можно сформулировать некоторые особенности решения такой задачи:

1. Чем больше горизонт прогноза, тем больше размерность задачи нелинейного программирования.

2. Чем меньше период дискретности цифровой системы управления судна, тем большим будет горизонт прогноза для достижения цели управления с желаемым качеством процессов.

3. Проверка выполнения ограничения в задаче (2) выполняется только в отдельных точках, соответствующих дискретным моментам времени  $k + 1, k + 2, \dots, k + P$ , соответственно, ограничения накладываемые на систему управления между этими точками могут нарушаться.

4. Степень сложности задачи оптимизации

(2) и, соответственно, вычислительные затраты на каждом такте формирования управления определяются также выбором типа прогнозирующей модели (1).

Ситуация существенно усложняется, если в систему вводятся ограничения на управления. В соответствии с исследованиями [7] формируется структура допустимого множества программных управлений, задаваемых системой ограничений на управляющее воздействие и контролируемые переменные:

1. Ограничение на управление (скорость перекадки руля):

$$u_{min} \leq u[i] \leq u_{max}; \quad i = k, \dots, k + P - 1;$$

$$u_{min} = -6^\circ/c, u_{max} = 6^\circ/c.$$

2. Ограничения на максимально допустимую кладку руля формируется из условия, что связь между величиной отклонения руля ( $\delta[k + 1]$ ) на  $(k + 1)$  такте и управлением ( $u[k]$ ) линейная:

$$\delta[k + 1] = \delta[k] + T_u[k],$$

то система ограничений сводится к системе линейных неравенств вида

$$\tilde{A}\tilde{u} \leq b,$$

где  $T_u$  – длительность периода управления;

$b$  – вектор, определяемый максимально допустимым отклонением руля  $\delta_{max} = 35^\circ$  и его текущим значением  $\delta[k]$ .

3. Ограничение на контролируемую переменную, т.е. на угловую скорость, формируется из условий нелинейная связь между программным управлением и прогнозируемыми значениями угловой скорости и сводится к системе нелинейных неравенств:

$$\tilde{u} = (u[k] \ u[k + 1] \ \dots \ u[k + P - 1])^T;$$

$$(\mathcal{Y}[k + 1] \ \mathcal{Y}[k + 2] \ \dots \ \mathcal{Y}[k + P]);$$

$$g(y[k], u[k], u[k + 1], \dots, u[k + P - 1]) \leq 0,$$

где  $y[k]$  – текущий выход объекта;

$g$  – параметр оптимизации.

Данное ограничение, совместно с ограничениями на скорость и отклонения руля, определяют в общем случае невыпуклое допустимое множество ( $\Omega$ ) управляющих воздействий. Ограничение угловой скорости для судна в работе задавалось  $\omega_{max} = 120$  °/мин.

При этом задача (2), решаемая на каждом такте формирования управления, сводится к задаче квадратичной оптимизации, управляющее воздействие является нелинейным и пересчитывается на каждом такте.

На основании исследования [2], приобретает особую значимость вопрос о снижении вычислительных затрат на перерасчет управления для каждого такта. Для снижения размерности в работах [7] используются следующие способы понижения размерности, позволяющие уменьшить время вычислений с сохранением требуемого качества процессов в замкнутой системе:

1. Увеличение периода дискретности управления кратного периоду функционирования системы управления. Таким образом, управление остается постоянным на  $s$  последовательных тактах

$$T_u = sT,$$

где  $s > 1$  – целое число – количество последовательных тактов.

Тогда выполняются следующие неравенства:

$$u[k] = u[k + 1] = \dots = u[k + s - 1],$$

⋮

$$u[k + (v - 1)s] = u[k + (v - 1)s + 1] = \dots = u[k + P - 1],$$

где  $v = P/s$ .

При этом размерность задачи (2) и форми-

рование программной последовательности понижаются до величины  $vm$ .

2. Использование горизонта управления ( $C$ ), меньшего горизонта прогноза ( $P$ ). В данной ситуации программное управление на горизонте прогноза определяется последовательностью векторов такой, что

$$u[k], u[k + 1], \dots, u[k + P - 1];$$

$$u[k + C - 1] = u[k + j];$$

$$j = \overline{C, P - 1},$$

где  $C$  – горизонт управления.

При этом размерность задачи нелинейного программирования уменьшается до величины  $Cm$ .

3. Одновременное использование периода ( $T_u$ ) дискретности управления и горизонта управления ( $C$ ) позволяет снизить размерность задачи оптимизации наиболее существенно.

При реализации управления с прогнозом, период функционирования цифровой системы судна  $T = 0,1$  с. При периоде дискретности управления  $T_u = 1$  с, размерность задачи оптимизации понижается в 10 раз.

Результаты моделирования показывают хорошую сходимость прогнозных и фактических значений управляемой динамической системы рис.3. Между тем, реализуемое моделирование оказывает высокую нагрузку на управляющее устройство – рулевую машину судна.

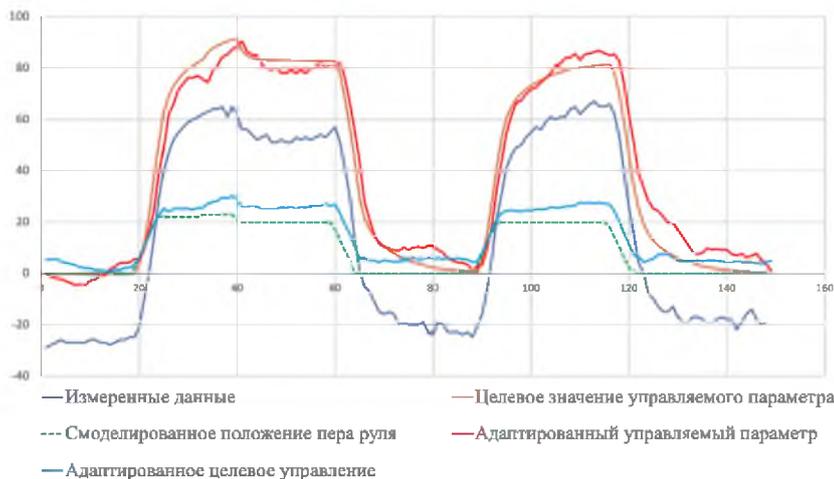


Рисунок 3 – Процесс циркуляции для управления с линейным прогнозом

Для дальнейшего снижения размерности задачи оптимизации предлагается осуществлять пересчет управления не на каждом такте управления, а в момент, когда прогнозная модель становится неадекватна наблюдаемому процессу. По-

мимо снижения вычислительных затрат на пересчет управления на каждом такте, данный способ позволит значительно снизить нагрузку на рулевое устройство судна.

В работе [11] для скорейшего обнаружения неадекватности модели реальному процессу

Р. Браун разработан способ анализа прогнозирующей системы по следящему контрольному сигналу, который определяется делением суммы погрешностей прогнозирования на их сглаженное абсолютное значение:

$$K_t = \frac{\sum_{i=0}^t e_i}{\bar{e}_t}; \quad \bar{e}_t = (1 - \gamma) \bar{e}_{t-1} + \gamma |e_t|, \quad (3)$$

где  $K_t$  – следящий контрольный сигнал;

$e_i$ ,  $\bar{e}_t$  – погрешность прогнозирования и ее сглаженное абсолютное значение;

$0 < \gamma < 1$  – постоянная сглаживания.

На основании работы такой прием имеет два недостатка.

Во-первых, когда контрольный сигнал вышел за установленные пределы, он не обязательно вернется в эти же пределы, даже если рассматриваемый процесс будет вновь развиваться по прежним законам и прогнозирующая модель окажется адекватной реальному процессу. Следовательно, потребуются вмешательство, чтобы сделать сумму погрешностей снова близкой к нулю.

Во-вторых, возможна и обратная ситуация, когда контрольный сигнал выходит из указанных пределов, а система начинает давать более точные прогнозы. Контрольный сигнал будет стремиться к бесконечности.

Д. Тригг предложил модификацию правила Р. Брауна [4] использованием вместо суммы погрешностей сглаженную погрешность и следящий контрольный сигнал принимает следующий вид:

$$K_t = \hat{e}_t / \bar{e}_t; \quad \hat{e}_{t+1} = \gamma e_t + (1 - \gamma) \hat{e}_t, \quad (4)$$

где  $\hat{e}_t$  – сглаженная погрешность.

Степень адекватности оценки спрогнозированных моделью (1) значений угловой скорости судна на циркуляции при моделировании системы автоматического управления с MPC регулятором с прерыванием процесса пересчета управления по контрольному сигналу (4) представлены на рис.4.

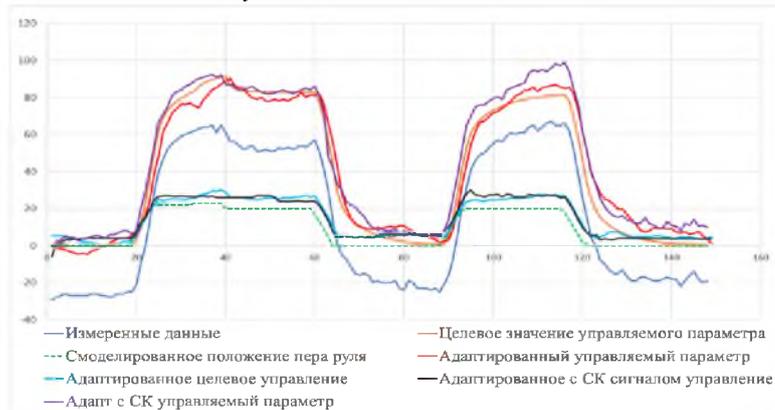


Рисунок 4 – Процесс циркуляции судна при управлении с линейным прогнозом и прерыванием следящим контрольным сигналом

Значения постоянной сглаживания в выражении (4) позволяют корректировать степень влияния на работу системы автоматического управления. При значениях  $\gamma = 0,9$  – система осуществ-

ляет более частые перерегулирования, при значениях  $\gamma = 0,1$  – система более мягко реагирует на расхождение модельных и прогнозируемых данных, тем самым уменьшая нагрузку на рулевое устройство судна рис. 5.

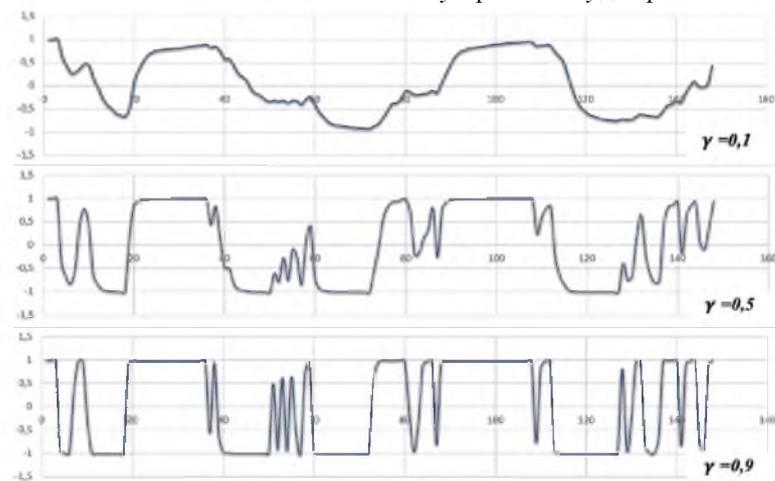


Рисунок 5 – Характер влияния постоянной сглаживания на работу системы автоматического управления

В процессе моделирования значение постоянной сглаживания равно 0,5 (см. рис.4). Использование данного метода позволило снизить нагрузку на управляющее устройство (рулевую машину судна) в 2 раза по сравнению с использованием системы автоматического управления с МРС регулятором, не снизив значительно качество управления с линейной прогнозной моделью.

#### Литература

1. Васьков, А.С. Методологические основы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. (05.22.16). – СПб.: ГМА им. адм. С.О.Макарова, 1998. – 48 с.
2. Григорьев, В.В. Синтез систем автоматического управления методом модального управления [Текст] / В.В. Григорьев, Н.В. Журавлева, Г.В. Лукьянова, К.А. Сергеев. – СПб.: Университет ИТМО, 2007. – 108 с.
3. Жиленков, А.А. Моделирование систем и комплексов. Дискретные системы прогностического управления в теории, задачах и примерах в MATLAB: учебное пособие [Текст]. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 79 с.
4. Керенский, А.М. О текущем предупредительном контроле процесса на базе экспоненциального сглаживания [Текст] / Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2009. – № 3(19) – С. 227-230.
5. Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами [Текст] / А.А. Красовский, В.Н. Буков, В.С. Щендрик. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
6. Лукашин, Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учебное пособие / Ю. П. Лукашин. – М.: Финансы и статистика, 2003. – 416 с.
7. Сотникова, М.В. Многоцелевые законы цифрового управления подвижными объектами: дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. (05.13.01). – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2016. – 371 с.
8. Прохоренков, А.М. Построение прогнозирующих моделей систем управления теплоэнергетическими объектами [Текст] / А.М. Прохоренков, Н.М. Качала // Вестник МГТУ. – 2011. – № 3. – С. 546-551.
9. Штанько, А.Н. Адаптация экспоненциального сглаживания параметров движения судна [Текст] / Эксплуатация морского транспорта. – 2021. – № 3(100). – С. 67-70.
10. Штанько, А.Н. Идентификация модели угловой скорости судна по экспериментальным данным [Текст] / В.Г. Мельник, А.А. Грищенко // Эксплуатация морского транспорта. – 2019. – № 3 (92). – С. 76-84.

11. Brown, R. Smoothing forecasting and prediction of discrete time series [Text] / Prentice-Hall. – N.Y. – 1963. – 488 p.

#### References

1. Vas'kov, A.S. Metodologicheskie osnovy upravleniya dvizheniem sudna i konfiguraciej zony navigacionnoj bezopasnosti [Tekst] / Avtoref. diss. na soisk. uch. st. d.t.n. (05.22.16). – SPb.: GMA im. adm. S.O.Makarova, 1998. – 48 s.
2. Grigor'ev, V.V. Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya metodom modal'nogo upravleniya [Tekst] / V.V.Grigor'ev, N.V.ZHuravleva, G.V.Luk'yanova, K.A.Sergeev. – SPb.: Universitet ITMO, 2007. – 108 s.
3. Zhilenkov, A.A. Modelirovanie sistem i kompleksov. Diskretnye sistemy prognosticheskogo upravleniya v teorii, zadachah i primerah v MATLAB: uchebnoe posobie [Tekst]. – SPb.: Universitet ITMO, 2019. – 79 s.
4. Kerenskij, A.M. O tekushchem predupreditel'nom kontrole processa na baze eksponencial'nogo sglazhivaniya [Tekst] / Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. – 2009. - № 3(19) – S. 227-230.
5. Krasovskij, A.A. Universalnye algoritmy optimal'nogo upravleniya nepreryvnyimi processami [Tekst] / A.A.Krasovskij, V.N.Bukov, V.S.SHCHendrik. – M.: Nauka, 1977. – 272 s.
6. Lukashin, YU. P. Adaptivnye metody kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennyh ryadov: uchebnoe posobie / YU. P. Lukashin. – M.: Finansy i statistika, 2003. – 416 s.
7. Sotnikova, M.V. Mnogocel'nye zakony cifrovogo upravleniya podvizhnyimi ob"ektami [Tekst] / Diss. na soisk. uch. st. d.t.n. (05.13.01). – SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet, 2016. – 371 s.
8. Prohorenkov, A.M. Postroenie prognoziruyushchih modelej sistem upravleniya teploenergeticheskimi ob"ektami [Tekst] / A.M. Prohorenkov, N.M. Kachala // Vestnik MGTU. – 2011. - № 3. – S. 546-551.
9. SHtan'ko, A.N. Adaptaciya eksponencial'nogo sglazhivaniya parametrov dvizheniya sudna [Tekst] / Ekspluataciya morskogo transporta. – 2021. - № 3(100). – S. 67-70.
10. SHtan'ko, A.N. Identifikaciya modeli uglovoj skorosti sudna po eksperimental'nym dannym [Tekst] / V.G. Mel'nik, A.A. Grishchenko // Ekspluataciya morskogo transporta. – 2019. – № 3 (92). – S. 76-84.
11. Brown, R. Smoothing forecasting and prediction of discrete time series [Text] / Prentice-Hall. – N.Y. – 1963. – 488 p.