ВЕСТНИК ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-206-214
УДК 620.395.01

В. В. Сахаров,
А. А. Чертков,
С. В. Сабуров

ПРЕДИКТИВНОЕ АПЕРИОДИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ВОДНОМ ТРАНСПОРТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Рассматривается апериодическое управление устойчивыми и неустойчивыми динамическими объектами на водном транспорте на основе дискретных математических моделей, представленных уравнениями в пространстве состояний, и его использование для решения задач прогноза. Способы и алгоритмы апериодического управления позволяют для класса наблюдаемых и управляемых объектов получить численные решения двухточечных граничных задач с обеспечением минимальной энергии на управление. В отличие от изложенного ранее метода экономии энергии на основе апериодического управления, предлагается в вычислительный алгоритм встроить процедуру оптимизации, реализуемую средствами квадратичного программирования, содержащимися, например, в инструментарии MATLAB, что позволяет ввести ограничения на вектор переменных состояния и управления и, следовательно, использовать апериодическое управление для построения прогнозирующих моделей. Для повышения эффективности расчетов в вычислительном алгоритме апериодического управления применена матрица академика А. Н. Крылова. Прогнозирующие модели на базе апериодического управления могут служить мощным теоретически обоснованным средством принятия оптимальных решений, полученных путем проведения многовариантного машинного эксперимента при изменении внешних условий и параметров объекта. Предлагаемые прогнозирующие модели на основе апериодического управления можно использовать в качестве дополнения к решениям, реализуемым с помощью класса прогнозирующих моделей численной оптимизации — Model Predictive Control (MPC), требующих больших объемов пошаговых вычислений в режиме реального времени. Приведены примеры апериодического управления динамическими объектами на водном транспорте с применением квадратичного программирования.

Ключевые слова: объект, дискретная модель, апериодическое управление, матрица, управляемость, наблюдаемость, математическое программирование, ограничения, экономия энергии.

Введение

Методы апериодического управления устойчивыми и неустойчивыми динамическими объектами, реализуемые на основе дискретных математических моделей, широко используются для решения задач прогноза с обеспечением минимальной энергии на управление [1], [2]. Апериодическими системами управления называют дискретные динамические системы, обеспечивающие перевод объектов, находящихся в заданном начальном состоянии, в конечное состояние в течение определенного времени. Принцип действия апериодических систем основан на известном в автоматике теоретическом положении, согласно которому управляемую и наблюдаемую дискретную линейную систему с размерностью матрицы состояния ($n\times n$) можно перевести из любого начального в конечное состояние не менее, чем за n шагов, при отсутствии ограничений. Если рабочее время системы составит N_p шагов, причем $N_p>n$, то такой переход может быть осуществлен при обеспечении минимума энергии на управление.

При отсутствии помех для объектов с одним входом вектор управления однозначно определяется векторами начального и конечного состояний, матрицей состояния дискретной системы и матрицей Крылова. Оценка элементов вектора управления производится на основе псевдоинверсии Мура–Пенроуза, что обеспечивает движение объекта по оптимальной траектории [1], [2].

Применение компьютерных вычислительных сред для апериодического управления динамическими объектами и технологическими процессами на водном транспорте позволяет кардинально изменить способы синтеза апериодических систем различного назначения.

Высокое быстродействие и производительность вычислительных систем дают возможность для класса дискретных динамических объектов путем вариации интервалов дискретности и их числа решать важный комплекс задач:

– идентифицировать объекты по экспериментальным характеристикам;

– оценивать внешние воздействия и компенсировать их влияние на поведение управляемых объектов;

– оптимизировать технологические процессы при управлении по нескольким каналам с различными критериями качества.

Широкому практическому применению апериодических систем с предиктивным управлением, как известно из [3] – [6], способствует возможность выполнения их структурных преобразований и различных модификаций, направленных на повышение эффективности и качества производственных и технологических процессов.

В отличие от известных методов экономии энергии на основе апериодического управления, предлагается в вычислительный алгоритм встроить процедуру оптимизации, реализуемую средствами квадратичного программирования, содержащимися, например, в инструментарии MATLAB, что позволяет использовать апериодическое управление для построения прогнозирующих моделей. Для повышения эффективности расчетов в вычислительном алгоритме апериодического управления применена матрица академика А. Н. Крылова.

Основная часть

Апериодическое управление динамическими объектами рассмотрим применительно к математической модели в пространстве состояний инвариантной во времени системы [2]:

$$\dot{x}(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \tag{1}$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t), \tag{2}$$

где A — (n×n)-матрица; B — (n×q)-матрица; C — (r×q)-матрица и D — (r×q)-вектор постоянных коэффициентов; $x(t)$ — (n×1)-мерный вектор состояния; $u(t)$ и $y(t)$ — соответственно векторы управления и выхода соответствующей размерности. Если $r < n$, то измеряются не все переменные состояния.

Для системы управления с одним входом $q = 1$ уравнения (1) и (2) упрощаются, и процедура поиска оптимальных решений может быть реализована с помощью инструментария функций математического программирования. Переход к базовой дискретной модели выполним с помощью соотношений, основанных на матричном экспоненциале:

$$A_d = e^{A \cdot T};$$

$$B_d = \int_0^T e^{A \cdot T} B d\tau,$$

где T — шаг дискретности.

В результате получим:

$$x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k); \tag{3}$$

$$y(k) = C_d \cdot x(k) + D_d \cdot u(k), \tag{4}$$

где k = 0, 1, 2, ... — номер такта, определяющий дискретный момент времени $t = k$·T.

Если принять $C_d = I$ и $D_d = 0$, то $y(k) = x(k)$ и программное предиктивное управление для данного класса объектов, обеспечивающее минимум энергии, как известно из [3] – [6], существенно упрощается. В этом случае без изменения структуры базовой модели, по мере необходимости, можно в реальном масштабе времени выполнять пошаговые оценки параметров модели средствами идентификации, применять динамические наблюдатели для восстановления вектора состояния по вектору выхода, осуществлять фильтрацию зашумленных сигналов, оценивать внешние возмущения и др.

Время прогноза T_p, определяющее горизонт предсказания, при управлении динамическим объектом всегда ограничено. Пусть окно горизонта предсказания, осуществляемого по уравнению (3), состоит из $N_p = T_p/T$ тактов. Окно горизонта управления содержит N_c тактов, что соответствует времени $T_c = T \cdot N_c$. Очевидно, что $N_c < N_p$. Движение дискретного объекта на тактах $k + 1$, $k + 2$, ..., $k + N_p$ определяется вектором управления

$$U = [u(k)\; u(k+1)\; u(k+2)\; \ldots\; u(k+N_c-1)]^T, \tag{5}$$

а если горизонты управления и прогноза совпадают, то управление

$$U = [u(k)\; u(k+1)\; u(k+2)\; u(k+N_p-1)]^T. \tag{6}$$

Задача апериодического управления при $N_c = N_p$ состоит в получении вектора U, обеспечивающего перевод объекта из состояния $x(k)$ в состояние $x(N_p)$ за время, определяемое числом тактов N_p, при минимизации критерия качества:

$$J = \frac{1}{2} U^T R U, \tag{7}$$

с учетом ограничения (3). Вектор U является программным управлением для прогнозирующей модели. Он формирует кусочно-постоянные сигналы с изменяющейся амплитудой в начале каждого шага. Применение алгоритма апериодического управления для прогноза состоит в решении двухточечной граничной задачи в условиях ограничений на заданном временном интервале, определенном горизонтом предсказания. Алгоритм синтеза основан на использовании дискретного матричного уравнения

$$x(N_p) = A_d^{N_p} \cdot x(k) + Kr \cdot U, \tag{8}$$

где $x(N_p)$ — вектор состояния в момент N_p (на правой границе — конечное состояние); $x(k)$ — вектор состояния на левой границе, принятый за начальное состояние в предиктивном окне; Kr — матрица Крылова; U — вектор управления (6).

Матрица Крылова полного ранга размерности ($n \times N_p$) имеет вид

$$Kr = \left[A_d^{N_p-1} \quad A_d^{N_p-2} \quad \ldots \quad A_d^{1} \quad A_d^{0} \right].* B_d. \tag{9}$$

Знак (.*) означает поэлементное умножение, применяемое в вычислительных средах. Заметим, что, согласно уравнению (8), $x(N_p)$ зависит от $x(k)$ на левой границе предиктивного окна и элементов вектора управления в моменты $[k, k + 1, ..., k + N_c]$. Если целевым назначением управления объектом является приведение его в состояние $x(N_p)$ за N_p тактов, т. е. конечное состояние известно, то такой переход может быть выполнен различными способами, отвечающими выбранным критериям оценки. Апериодическое управление, обеспечивающее минимум (7), следует оценивать с помощью соотношения

$$U = Kr^+ \cdot [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)], \tag{10}$$

где Кr^+ — операция псевдоинверсии Мура–Пенроуза.

Из соотношения (10) видно, что если $N_p = n$ и $N_c = N_p$, то перевод объекта из начального состояния в конечное выполняется в течение минимального времени. Квадратная матрица Крылова, соответствующая этому режиму, имеет полный ранг и должна инвертироваться. Если же $N_p > n$, то переход осуществляется за N_p шагов при минимальном значении (7), поскольку

$$J_{\min} = \frac{1}{2}\left[Kr^+ \cdot [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)] \right]^T \cdot R \cdot \left[Kr^+ \cdot [x(N_p) - A_d^{N_p} \cdot x(k)] \right],$$

где R — диагональная (положительно определенная) матрица весовых коэффициентов, приписываемых каждому элементу вектора управления на горизонте предсказания. Из приведенных соотношений следует, что U не зависит от R, а соотношения (7) и (10) позволяют сформулировать задачу управления в терминах квадратичного программирования, используя для решения инструментарий Optimization Toolbox среды MATLAB. При этом минимизация соотношения (7) должна выполняться для заданных рабочих интервалов N_c и N_p при соблюдении ограничения-равенства

$$Kr \cdot U = [x(N_p) - A_d^{\ N_p} \cdot x(k)] \tag{11}$$

на всех режимах, с учетом изменений вектора управления в допустимых пределах

$$LB < U < UB,$$

где LB и UB — соответственно нижняя и верхняя границы вектора управления.

Поскольку на каждом шаге может выполняться решение (3), эта информация применима для получения функциональных ограничений-неравенств на векторы выхода и состояния.

Рассмотрим применение апериодического управления для решения задачи прогноза на конкретных примерах. Предположим, что объект управления описывается дифференциальными уравнениями (1) и (2), где $A = -0.2231$, $B = 0.1116$; $C = 1$; $D = 0$. Выберем шаг дискретности $T = 1.0$, для которого дискретный вариант модели будет содержать численные значения коэффициентов $A_m = 0.8$; $B_m = 0.1$; $C_m = 1$; $D_m = 1$. Теперь сформируем обобщенную дискретную прогнозирующую модель объекта, принятую в теории предиктивных систем класса MPC [2], по следующему правилу:

$$x(k+1) = A_d \cdot x(k) + B_d \cdot u(k), \tag{12}$$

где $A_d = \begin{bmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m \cdot A_m & 1 \end{bmatrix}$ и $B_d = \begin{bmatrix} B_m \\ C_m \cdot B_m \end{bmatrix}$.

Для определенности C_d примем равной единичной матрице. Если вектор $D_d = [0\ 0]^T$, то, согласно уравнению (4), получим $y(k) = x(k)$. Ниже приведен фрагмент скрипт-файла, составленного в кодах MATLAB, по которому выполнены расчеты для различных окон предсказания N_p и управления N_c. Фрагмент скрипт-файла представлен двумя блоками. В первом блоке содержится матрица Крылова и операторы оценки вектора управления U для «жесткого» перевода объекта в заданное конечное состояние. Во втором блоке представлены операторы квадратичного программирования, используемые для решения задачи прогноза при различных окнах управления N_c, изменяющихся внутри фиксированного окна N_p. Перевод объекта в состояние $x(N_p)$ обеспечивается с помощью ограничения-равенства $A_{eq} \cdot U = b_{eq}$.

```
% Апериодическое управление на горизонте предсказания:
Kr=gallery('krylov',Ad,Bd,Np-l); Krl=fliplr(R)
W=inv(Krl*Krl')*Krl; u=W'*[xNp-Ad^Np*xO]
% Квадратичное программирование:
H=eye(Np-l);
A=Q;b=D;Hl;
Aeq=Krl; beq=Krl *u;
lb=[ones(Nc,l)*(-Inf);ones(Np-1-Nc, 1)*0];
ub=[ones(Nc,l)*Inf;ones(Np-1-Nc,l)*0];
[uAp,J 1 ]=quadprog(2*H,f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
```

На рис. 1 представлен процесс перехода объекта в конечное состояние $x(N_p) = [0\ 1.0]^T$ при векторе начальных условий $x(k) = [0.1\ 0.2]^T$. Окна горизонта предсказания и управления $N_p = N_c = 10$. Масштаб переменной состояния $X(1)$ принят равным трем. Критерий качества $J_{\min}(10) = 0.4460$.

Траектории объекта при тех же граничных условиях, но различных окнах предсказания и управления, приведены на рис. 2. Видно, что $N_c = 4$ и $N_p = 10$. Значение критерия качества $J_{\min}(4) = 6.4857$. Объект переводится в заданное конечное состояние на правой границе окна предсказания.

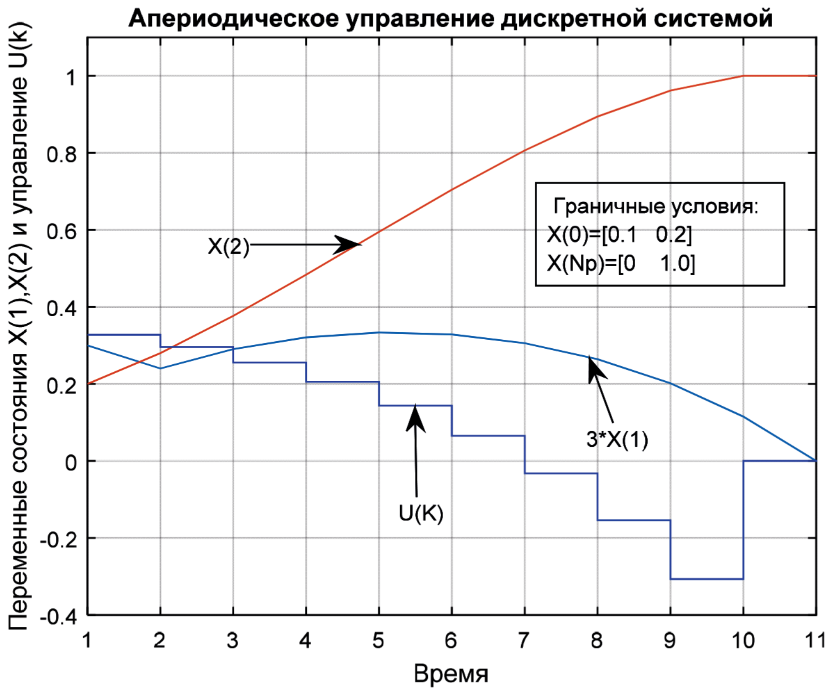

Рис. 1. Управление объектом при $N_p = 10$ и $N_c = 10$

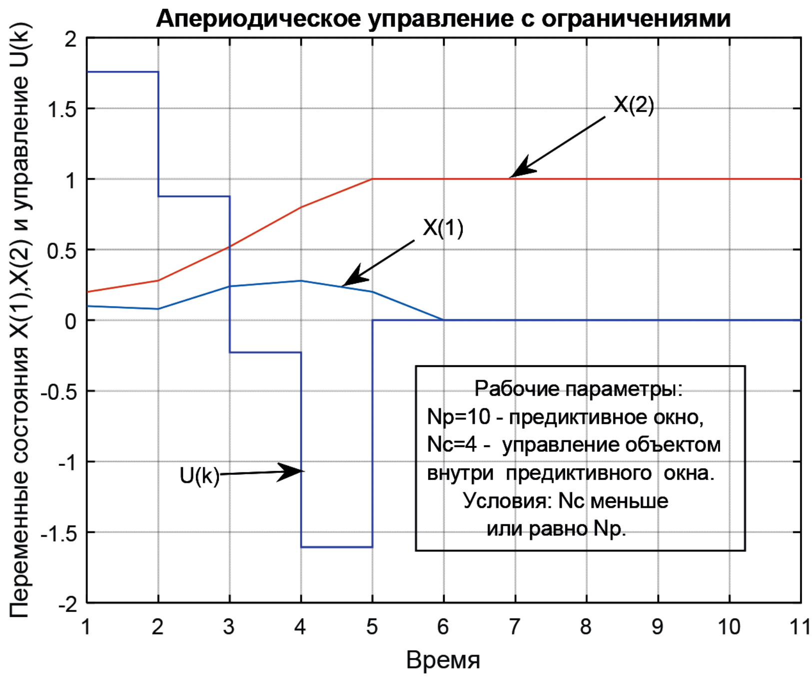

Рис. 2. Управление объектом при $N_p = 10$ и $N_c = 4$

Прогнозирование с применением апериодического управления неустойчивым дискретным объектом рассмотрим на примере модели макроэкономики, приведенной в работах [7], [8]. Дискретная модель описывается следующим матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} x1(k+1) \\ x2(k+1) \\ x3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,852 & -0,158 & 0,156 \\ -0,328 & -0,499 & 0,403 \\ 0,527 & 0,356 & 0,557 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x1(k) \\ x2(k) \\ x3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0,125 \\ 0,425 \\ 0,301 \end{bmatrix} \cdot u(k) \qquad (13)$$

с векторами граничных условий в предиктивном окне:

$$\begin{bmatrix} x1(0) \\ x2(0) \\ x3(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 460.1 \\ 113.1 \\ 718.4 \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x1(Np) \\ x2(Np) \\ x3(Np) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 500.0000 \\ 117.0000 \\ 771.20008 \end{bmatrix}.$$

Здесь используются следующие обозначения: $x1(k) = c(k)$ — потребление; $x2(k) = y(k)$ — суммарные государственные закупки; $x3(k) = 1(k)$ — валовой национальный продукт; $u(k) = 1(k)$ — инвестиции.

Собственные значения приведенной выше матрицы состояния:

$$\lambda_1 = -0.6835;\ \lambda_2 = 1.0240;\ \lambda_3 = 0.5696,$$

что свидетельствует о неустойчивости объекта. Выберем окно прогноза N_p=12 и рассмотрим предиктивное управление для двух окон управления: N_c=12 и N_c=9. Для вектора управления введем следующие ограничения: инвестиции $I(k)$ не должны быть отрицательными и в то же время на каждом шаге прогноза максимальное их значение не должно превышать 800 единиц.

Обсуждение основных результатов

На рис. 3 приведены результаты моделирования дискретного объекта (13) с расчетом элементов вектора управления на каждом шаге в окне прогноза. Для подтверждения корректности вычислений приводится фрагмент матрицы, содержащей переменные состояния на первых трех шагах:

	$x(1)$	$x(2)$	$x(3)$	$u = 1$
1	460.1000	113.1000	718.4000	386.3865
2	486.2058	82.1655	682.8851	375.0256
3	459.4970	238.9409	782.1507	366.8620
…	…	…	…	…
11	443.8355	211.1054	875.0402	119.3817
12	466.3767	152.4587	832.3861	24.9338
13	500.0000	117.0000	771.2000	0

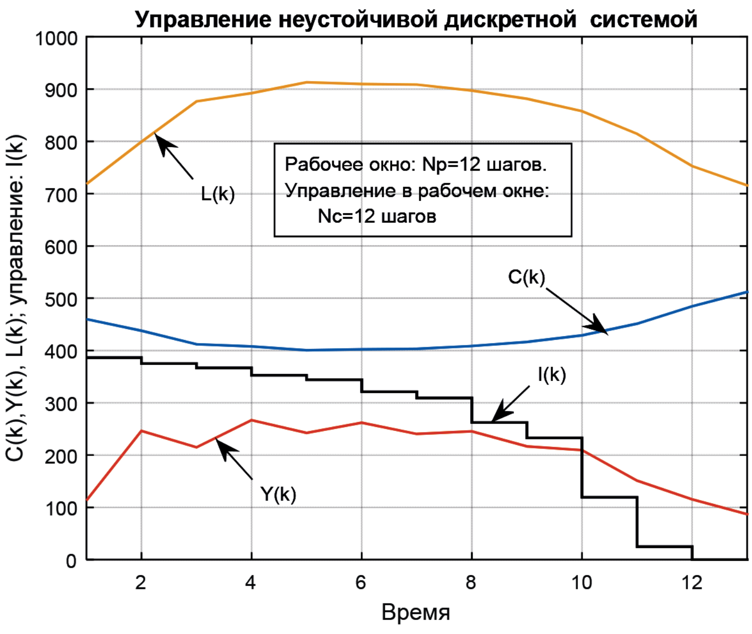

Рис. 3. Апериодическое управление объектом в окне прогноза с рабочими параметрами N_p = 12 и N_c = 12

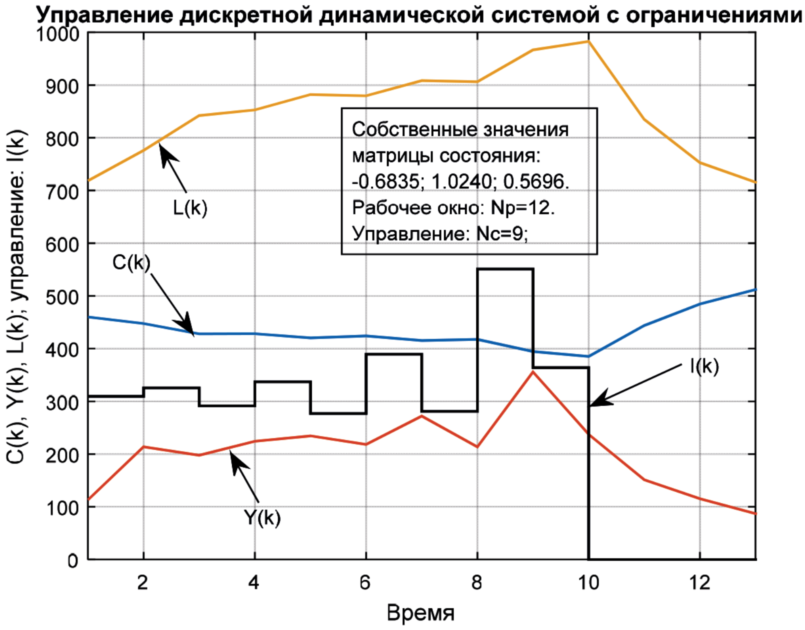

Рис. 4. Апериодическое управление экономическим объектом с окном прогноза $N_p = 12$ и окном управления $N_c = 9$

На рис. 4 указаны текущие значения переменных состояния и управления объектом (13) при тех же граничных условиях, полученные для рабочих параметров окна прогноза: $N_p = 12$ и $N_c = 9$.

Выводы

1. Модели предиктивного апериодического управления для рассматриваемого класса объектов водного транспорта могут служить инструментом для создания механизма принятия решений, обеспечивающих повышение энергоэффективности реализуемых технологических процессов и производств [5], [6].

2. Модельные количественные оценки и прогнозирование поведения дискретных динамических объектов при вариации параметров, ограничений, анализе и моделировании широкого спектра внешних воздействий позволяют на качественно новом уровне совершенствовать процессы организации и управления практически на всех предприятиях водного транспорта.

3. Компьютерный эксперимент с применением модельного прогнозирования должен стать рабочим инструментом менеджеров при выборе оптимальных решений в логистике, экономике и эксплуатации водного транспорта с использованием институтов рынка для развития производства [9] – [13].

4. Специфика производственных моделей в экономике, их склонность к потере устойчивости, высокая чувствительность к вариации параметров и внешним воздействиям предопределяют количественные оценки и выбор решений, базирующихся на предиктивных моделях, что подтверждается рассмотренным примером апериодического управления макроэкономической системой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сахаров В. В.* Применение матрицы Крылова для апериодического управления динамическими объектами / В. В. Сахаров, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 83а–87.

2. *Сахаров В. В.* Модели и алгоритмы оптимизации технологических процессов на объектах водного транспорта в среде MATLAB: монография / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин, А. А. Чертков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 436 с.

3. *Wang L.* Model predictive control system design and implementation using MATLAB / L. Wang. — Springer-Verlag London Limited, 2009. — 403 p. DOI: 10.1007/978-1-84882-331-0.

4. *Qin S. J.* A survey of industrial model predictive control technology / S. J. Qin, T. A. Badgwell // Control Engineering Practice. — 2003. — Vol. 11. — Is. 7. — Pp. 733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

5. *Rodriguez J.* Predictive current control of a voltage source inverter / J. Rodr'iguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, U. Ammann // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2007. — Vol. 54. — Is. 1. — Pp. 495–503. DOI: 10.1109/TIE.2006.888802.

6. *Miranda H.* Predictive torque control of induction machines based on state-space models / H. Miranda, P. Cort'es, J. I. Yuz, J. Rodriguez // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2009. — Vol. 56. — Is. 6. — Pp. 1916–1924. DOI: 10.1109/TIE.2009.2014904.

7. *Воронцовский А. В.* Моделирование экономического роста с учетом неопределенности макроэкономических факторов: исторический обзор, проблемы и перспективы развития / А. В. Воронцовский, А. Л. Дмитриев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5. Экономика. — 2014. — № 2. — С. 5–31.

8. *Воронцовский А. В.* Прогнозирование макроэкономических показателей в режиме имитации на основе стохастических моделей экономического роста для малой открытой экономики / А. В. Воронцовский, А. Ю. Дикарев // Финансы и бизнес. — 2013. — № 2. — С. 33–51.

9. *Грешилов А. А.* Математические методы принятия решений / А. А. Грешилов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 584 с.

10. *Козлов В. Н.* Системный анализ и принятие решений / В. Н. Козлов. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008. — 223 с.

11. *Сорина Г. В.* Принятие решений как интеллектуальная деятельность: монография / Г. В. Сорина. — М.: «Канон +», «Реабилитация», 2009. — 272 с.

12. *Ларичев О. И.* Вербальный анализ решений / О. И. Ларичев. — М.: Наука, 2006. — 181 с.

13. *Niederle* M. Market culture: How norms governing exploding offers affect market performance / M. Niederle, A. E. Roth // American Economic Journal: Microeconomics. — 2009. — Vol. 1. — No. 2. — Pp. 199–219. DOI: 10.1257/mic.1.2.199.

PREDICTIVE APERIODIC CONTROL OF DYNAMIC OBJECTS ON WATER TRANSPORT USING MATHEMATICAL PROGRAMMING

Considered aperiodic control of stable and unstable dynamic objects on water transport based on discrete mathematical models, represented by equations in state space, and it implementation for predictive control. Methods and algorithms for aperiodic control allow for a class of observed and managed objects to obtain the numerical solution of two-point boundary value problems with minimum energy control. In contrast to the previously described method of saving energy on the basis of aperiodic control [ ], the proposed computational algorithm is to embed the optimization procedure by means of quadratic programming, i.e., in the Toolbox of Mat LAB, that allows to impose restrictions on the vector of state variables and control and, therefore, the use of aperiodic control to build prediction models. To improve the efficiency of calculations in the computational algorithm of deadbeat control applied to matrix A. N. Krylov. A prediction model based on the aperiodic control can be a powerful theoretically sound tool for making optimal solutions obtained by multivariate machine experintent under changing external conditions and parameters of the object. The proposed predictive model based on the aperiodic control can be used as a supplement to the decisions performed using a class of predictive models of numerical optimization - Model Predictive Control (MPC), wherein large volumes of step-by-step calculations in real time regime. Examples of aperiodic control of dynamic objects on water transport with the use of quadratic programming are considered.

Key words: object, discrete model, aperiodic control, matrix, controllability, observability, mathematical programming, constraints, energy saving.

REFERENCES

1. Saharov, V. V., and V. I. Korolev. “Krylov matrix application to dynamic plants aperiodic control.” *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikatsij* 1 (2011): 83a–87.

2. Saharov, V. V., A. A. Kuzmin, and A. A. Chertkov. *Modeli i algoritmy optimizacii tehnologicheskih processov na obektah vodnogo transporta v srede MATLAB: monografija*. Spb.: GUMRF imeni adm. S.O. Makarova, 2015.

3. Wang, Liuping. *Model predictive control system design and implementation using MATLAB*. Springer-Verlag London Limited, 2009. DOI: 10.1007/978-1-84882-331-0.

4. Qin, S. J., and T. A. Badgwell. "A Survey of Model Predictive Control Technology." *Control Engineering Practice* 11.7 (2003): 733–764. DOI: 10.1016/S0967-0661(02)00186-7.

5. Rodriguez, J., J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, and U. Ammann. "Predictive current control of a voltage source inverter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54.1 (2007): 495–503. DOI: 10.1109/TIE.2006.888802.

6. Miranda, H., P. Cortes, J. I. Yuz, and J. Rodriguez. "Predictive torque control of induction machines based on state-space models." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 56.6 (2009): 1916–1924. DOI: 10.1109/TIE.2009.2014904.

7. Vorontsovskiy, Aleksey V., and Anton L. Dmitriev. "Economic growth modeling under uncertainty of macroeconomic factors: history review, problems and prospects." *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 5. Economics* 2 (2014): 5–31.

8. Voroncovskij, A. V., and A. Ju. Dikarev. "Prognozirovanie makroekonomicheskih pokazatelej v rezhime imitacii na osnove stohasticheskih modelej ekonomicheskogo rosta." *Finansy i biznes* 2 (2013): 33–51.

9. Greshilov, A. A. *Matematicheskie metody prinjatija reshenij*. M.: MGTU im. N. E. Baumana, 2006.

10. Kozlov, V. N. *Sistemnyj analiz i prinjatie reshenij*. SPb.: SPbGPU, 2008.

11. Sorina, G. V. *Prinjatie reshenij kak intellektualnaja dejatelnost: monografija*. M.: «Kanon +», «Reabilitacija», 2009.

12. Larichev, O. I. *Verbalnyj analiz reshenij*. M.: Nauka, 2006.

13. Niederle, M., and A. E Roth. "Market culture: How norms governing exploding offers affect market performance" *American Economic Journal: Microeconomics* 1.2 (2009): 199–219. DOI: 10.1257/mic.1.2.199.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сахаров Владимир Васильевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
saharov@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
Чертков Александр Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
chertkov51@mail.ru
Сабуров Сергей Валерьевич — аспирант.
Научный руководитель:
Сахаров Владимир Васильевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
kaf_osnipr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Saharov Vladimir Vasilevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
saharov@rambler.ru, SaharovVV@gumrf.ru
ChertkovAlexandrAlexandrovich —
PhD, associate professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
chertkov51@mail.ru
Saburov Sergey Valerevich — postgraduate.
Supervisor:
Saharov Vladimir Vasilevich.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
kaf_osnipr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 августа 2016 г.