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

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

УДК 658.5:629.5 (470.21)

В. В. Сахаров,
д-р техн. наук, профессор
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Кузьмин,
канд. техн. наук, профессор,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова;

А. А. Чертков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ В СУДОРЕМОНТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТРИЦЫ КРЫЛОВА

ADOPTING OPTIMAL DECISIONS WITH APPLICATION KRYLOV MATRIX ALGORITHM IN SHIP-REPAIR COMPANIES

В статье рассматривается алгоритм принятия решений по управлению судоремонтным производством, базирующийся на численных методах оптимизации технологических процессов с использованием функций инструментария Optimization Toolbox вычислительной среды MATLAB. Для повышения устойчивости вычислений, сокращения времени поиска оптимума в условиях ограничений в алгоритме используется матрица Крылова. Применение алгоритма демонстрируется на примере модели минимизации суммы разовых выплат заемных средств при замене устаревшего оборудования и обновления основных фондов предприятия.

This paper presents adopting decisions algorithm for ship – repairing production control based on numerical optimization methods in operating the technological processes. The MATLAB Optimization Toolbox functions are used for effective decisions. Krylov matrix is used for improving stability and time numerical operations decrease. Algorithm implementation is shown by means of minimizing of one-time payments of loans when applying obsolete equipment replacement and basic funds renovation.

Ключевые слова: судоремонтные предприятия, алгоритм, обновление, конкурентоспособность, инвестиции, оптимизация и управление.

Key words: the ship-repair companies, algorithm, renovation, competitiveness, investment, optimization and control.

ПРОЦЕССЫ глобализации и усиления международной конкуренции, характеризующие мировую экономику, явились объективной предпосылкой обновления российского флота, преодоления негативных тенденций сокращения флота и его морального старения. В настоящее время в условиях рыночной экономики происходят кардинальные изменения в развитии предприятий водного транспорта и повышении эффективности их функционирования. Концептуально определены механизмы повышения эксплуатационных показателей судов, качества обслуживания во всех сферах деятельности, в том числе при ремонте судов и реконструкции основных фондов судостроительных и судоремонтных предприятий в соответствующих секторах рынка, с учетом интересов государства, судоходных компаний и судовладельцев.

Важное направление повышения эффективности и качества работы судостроительных и судоремонтных предприятий составляют процессы управления ресурсами на основе современных технологий и оптимизационных процедур. Концепция энергосбережения, управления ресурсами предприятий на основе современной теории оптимизации с гибким использованием институтов рынка позволяет на качественно новом уровне решать проблему снижения стоимости перевозок. Оптимизационные процессы являются исключительно наукоемкими и требуют для практической реализации применения методов исследования операций, а также численных методов и алгоритмов принятия наилучших решений в конкретных производственных условиях. Поэтому вопросы создания алгоритмов и технических средств, предназначенных для определения рациональных схем расходования ресурсов судоремонтных предприятий в условиях дефицита, приобретают особую актуальность.

Судоремонт вносит существенный вклад в обеспечение эффективной эксплуатации и восстановление технического состояния судов, реализацию реновационных процессов, развитие и совершенствование отечественного флота. Различные виды ремонта и модернизации обусловливают организационные и технологические особенности судоремонтного производства, способы обеспечения соответствия продукции требованиям техники безопасности и экологическим нормам, установленным международными стандартами.

Ремонт судна является сложным производственным процессом. Недостаточная изученность комплекса проблем, связанных с совершенствованием управления судоремонтом, в известной мере объясняется высокой сложностью математического описания, способами формализации модельных решений в условиях территориального рассредоточения ремонтной базы, существенного износа основных производственных фондов, нечетким управлением запасами материальных и технических средств. Процессы управления судоремонтом в условиях рынка характеризуются снижением спроса на ремонтные работы, недостаточным уровнем автоматизации энергоемких технологических операций. Поэтому в условиях дефицита бюджета и материальных ресурсов кардинальные изменения в технике и технологиях проведения судоремонта на предприятиях отрасли могут быть достигнуты только на основе фундаментальных научных положений при широком спектре прикладных исследований в данной предметной области. Исследования должны базироваться на использовании математической теории, моделей и методов управления качеством, новых способах анализа данных измерений и их обработки, принципах управления ресурсами с применением компьютерных технологий и программных средств [2].

В настоящее время достигнут определенный прогресс в развитии бизнеса судоремонтных предприятий за счет реновации, внедрения новых технологий и принятия оптимальных решений при управлении производственными процессами. К таковым можно отнести процессы совершенствования управления качеством сборки судовых механизмов и машин на основе применения статистических методов контроля, использования контрольных карт при обработке результатов измерений и временных рядов. Находят применение производные (двойные) карты для управления качеством продукции при заданных статистических допусках. Выполняется контроль технических характеристик станочного и иного оборудования судоремонтных предприятий с помощью карт контроля качества, для получения которых используют инструментарий вычислительных сред (например, Industrial Statistics среды MATLAB), обеспечивающий автоматическое построение характеристик и вычисление дефектов. Для совершенствования управления технологическими процессами в судоремонте применяются статистические методы контроля качества и мониторинга, базирующиеся на парадигме нормального распределения с большим числом функций, позволяющих количественно оценивать случайные процессы, наблюдаемые в системе «станок–приспособление–инструмент–деталь» и др.

Отметим, что основу совершенствования технологических процессов в судоремонте составляют современные методы и алгоритмы численной оптимизации [4]. Оптимизационные процедуры позволяют получать научно обоснованные количественные оценки для принятия оптимальных решений, а в иных случаях оценивать потери, вызванные отступлением от оптимума. Поскольку модели технологических процессов в судоремонтном производстве часто представляются нелинейными функциями, для поиска оптимальных решений и управления предлагается алгоритм, предназначенный для класса производственных задач распределения ресурсов. Алгоритм основан на применении функций математического программирования, с использованием матрицы Крылова, для совершенствования управления дискретными динамическими процессами с заданными граничными условиями при фиксированном времени перехода из начального в конечное состояние. Кратко остановимся на рассмотрении алгоритма.

Алгоритмом реализуется процедура оптимизации квадратичных критериев качества с введением ограничений на переменные состояния и ограничений — равенств, устанавливаемых с помощью матриц Крылова. Для класса объектов применение квадратичных критериев позволяет привести задачу к виду, эквивалентному минимизации «энергетических потерь» на управление [3, с. 83–87].

Рассмотрим дискретную динамическую модель системы:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \qquad k = 0, 1, ..., N, \tag{1}$$

которой необходимо управлять при заданных значениях $x(0)$ и $x(N)$, где $x(0)$ — вектор начального состояния; $x(N)$ — вектор переменных состояния на N-м шаге решения (1); A, B — матрицы состояния и управления соответствующей размерности. Без потери общности будем считать систему инвариантной во времени.

Для полностью управляемой и наблюдаемой системы (1) можно установить однозначную связь между векторами начального и конечного состояний системы с помощью формулы

$$x(N) = A^n \cdot x(0) + D \cdot \left[u(0)\, u(1) \ldots u(N-1)\right]', \tag{2}$$

где $D = [A^{N-1} \cdot B \;\; A^{N-2} \cdot B \ldots A \cdot B \;\; B]$ — прямоугольная матрица полного ранга. Отличительная особенность (2) состоит в том, что для системы с одним входом может быть найдена наилучшая оценка вектора управления:

$$U = [u(0)\, u(1) \ldots u(N-1)].$$

Если $N = n$, где $(n \times n)$ — размерность матрицы состояния A, то D является квадратной матрицей, и, следовательно, путем ее инверсии, согласно принципу Заде, может быть получен вектор U, обеспечивающий максимальное быстродействие или минимальное время перехода из заданного начального в принятое конечное состояние. В общем случае можно принять $x(N) = 0$. При этом будет затрачена максимальная энергия на управление, а минимальное время составит $k = n$ шагов. В том же случае, когда $N > n$, инверсной матрицы не существует. Однако наилучшие оценки U могут быть получены с помощью псевдоинверсии Мура–Пенроуза либо методов минимизации других норм.

Если оценить U с помощью формулы

$$U = \left(D \cdot D'\right)^{-1} \cdot D \cdot \left[x(N) - A^N \cdot x(0)\right], \tag{3}$$

то (3) обеспечит минимум критерия качества:

$$J = \frac{1}{2} U' \cdot U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N-1} U^2(i), \tag{4}$$

что соответствует минимальным энергетическим затратам на управление.

Как следует из (3), воспользоваться критерием (4) возможно, только построив матрицу D. Одним из известных простых способов построения такой матрицы является метод академика А. Н. Крылова, выдающегося ученого с мировым именем. Отличительной особенностью научных трудов А. Н. Крылова является то, что наряду с чисто практической направленностью в них развиты и обобщены применяемые средства математического анализа до такой степени полноты и глубины, что эти труды могут быть отнесены как к кораблестроению, так и к прикладной математике, процессам управления и другим наукам. В подтверждение сказанного следует особо подчеркнуть, что в современных вычислительных средах матрица Крылова применена в качестве инструментария для решения задач управления динамическими процессами. Матрица Крылова впервые была представлена в его работе, известной теперь как подпространство Крылова или

«Методы подпространства Крылова» [1]. Работа касалась проблем собственных значений, в частности вычисления коэффициентов характеристического полинома:

$$D(\lambda) = \det(A - \lambda E) = (-1)^n (\lambda^n + p_1 \lambda^{n-1} + p_2 \lambda^{n-2} + \ldots + p_n) \quad (5)$$

заданной матрицы.

А. Н. Крылов коснулся эффективности вычислений и, как настоящий ученый-вычислитель, начал с тщательного сравнения существующих методов, что связано с оценкой худшего сценария вычислительных затрат в методе Якоби. В результате он представил собственный метод, который был признан лучшим из известных к тому времени методов.

Подпространство Крылова размерности m, порожденное вектором v и матрицей A, — линейное пространство:

$$K_m = K_m(A, v) = span\{v, Av, A^2 v, \ldots, A^{m-1} v\},$$

где оператор *span* означает спектр собственных значений матрицы A размерности n.

Построив подпространство Крылова, можно спроецировать на него исходную систему уравнений, решение спроецированной системы будет наилучшим приближением к решению исходной системы.

Академик А. Н. Крылов указал удобный метод раскрытия определителя в левой части уравнения (5). Сущность метода заключается в том, что определитель путем алгебраических преобразований приводится к такому виду, который позволяет его легко вычислить.

Трудность раскрытия определителя состоит в том, что неизвестная величина λ входит только в диагональные элементы. Методом А. Н. Крылова определитель в левой части (5) преобразуется так, что неизвестные величины λ оказываются не диагональными его элементами, а элементами столбца. Это дает возможность на основании известных свойств определителей разложить его по элементам этого столбца, довольно просто представить определитель в уравнении (5) в виде многочлена и получить алгебраическое уравнение с неизвестным λ.

Здесь же, не вдаваясь в теоретические подробности, используем метод академика Крылова для нахождения матрицы $D(\lambda)$.

Для применения метода Крылова надо выполнить следующее:

1) составить первые строки последовательных степеней матрицы A, то есть первые строки матриц $A^2, A^3, A^4, \ldots, A^n$.

Если обозначить через $a_{1j}^{(k)}$ элементы первой строки k-й степени матрицы A, то их просто можно определить по формуле приведения

$$a_{1j}^{(k)} = \sum_{\beta=1}^{n} a_{1\beta}^{(k-1)} a_{\beta j}, \quad (6)$$

где верхний индекс (k) — указатель степени матрицы, причем $k = 2, 3, 4, \ldots, n$; $j = 1, 2, \ldots, n$, $a_{1j}^{(1)} = a_{1j}$.

Формула (6) позволяет по известным элементам первой строки матрицы A^{k-1} и элементам матрицы A найти элементы первой строки матрицы A^k.

Таким образом, должны быть составлены матрицы:

$$A^2 = \begin{bmatrix} a_{11}^{(2)} & a_{12}^{(2)} & \ldots & a_{1n}^{(2)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{bmatrix};$$

$$A^3 = \begin{bmatrix} a_{11}^{(3)} & a_{12}^{(3)} & \ldots & a_{1n}^{(3)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \end{bmatrix};$$

$$A^4 = \begin{bmatrix} a_{11}^{(4)} & a_{12}^{(4)} & \dots & a_{1n}^{(4)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix};$$

$$A^n = \begin{bmatrix} a_{11}^{(n)} & a_{12}^{(n)} & \dots & a_{1n}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

2) после того как первые строки степеней матрицы A найдены, необходимо составить определи следующего вида:

$$D(\lambda) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \lambda & a_{11}^{(1)} & a_{12}^{(1)} & a_{13}^{(1)} & \dots & a_{1n}^{(1)} \\ \lambda^2 & a_{11}^{(2)} & a_{12}^{(2)} & a_{13}^{(2)} & \dots & a_{1n}^{(2)} \\ \lambda^3 & a_{11}^{(3)} & a_{12}^{(3)} & a_{13}^{(3)} & \dots & a_{1n}^{(3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \lambda^n & a_{11}^{(n)} & a_{12}^{(n)} & a_{13}^{(n)} & \dots & a_{1n}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

в которых степени неизвестной величины λ уже расположены в первом столбце, а строки степеней матрицы A являются строками минора элемента, стоящего в левом верхнем углу матрицы (7).

Этот определитель тождествен определителю левой части:

$$\det(A - \lambda E)$$

уравнения (5), а раскрыть его значительно проще, необходимо разложить его по элементам первого столбца. Получится уравнение степени n относительно λ. Решение его и даст собственные значения исходной матрицы. Определитель матрицы (7) является определителем Крылова. Таким образом путем преобразования определителя $\det(A - \lambda E)$ в уравнении (5) к виду (7) обойдены все трудности, связанные с его раскрытием.

Построение подпространства (матрицы) Крылова в вычислительной среде MATLAB осуществляется на основе функции gallery, синтаксис и описание которой следующие:

Синтаксис:

K=gallery('krylov', A, x, j)

K=gallery('krylov', n)

Описание:

Функция K=gallery('krylov', A, x, j) возвращает прямоугольную матрицу Крылова размера nxm вида [x,Ax, A^2x,…,A^(m-1)x], где A — произвольная матрица порядка n и x — вектор размерности (nx1). По умолчанию, x=ones(n,1) и $m = n$.

Алгоритм принятия оптимальных решений инвариантен к физической природе задачи. Он применим для решения задач энергосбережения на объектах водного транспорта, для оптимального (по расходу энергии) управления рулевым комплексом и любых других задач, сформулированных в терминах моделей, отвечающих уравнениям (1)–(4).

В связи с этим, принимая во внимание практическую важность задач управления ресурсами на судоремонтных предприятиях, авторы предложили использовать алгоритм принятия оптимальных решений для управления инвестициями в производство, с целью развития технологической базы и обновления основных фондов.

Известно, что в процессе финансирования инвестиционных кредитов на предприятии решаются две задачи: инвестор (банк, инвестиционная компания) предоставляет заемные средства под определенную процентную ставку, преследуя получение прибыли. Предприятие или компания, занимающая средства, стремится минимизировать выплаты на погашение кредитов. Таким образом, на рынке инвестиционных услуг устанавливаются определенные компромиссные отношения между спросом и предложением. Инвестор предоставляет заем под процентную ставку, зависящую от характера спроса на инвестиционные средства. Рыночная ставка процента назначается неслучайно. Инвестор всегда сравнивает ожидаемый доход на капитал с текущей рыночной ставкой процента, что определяет также категорию процента.

Для предприятия как составной части корпоративного объединения заем для обновления технических средств и технологий работы представляется исключительно важной и ответственной производственной задачей со многими возможными сценариями. При займе средств под реализацию проекта требуется из всех возможных выбрать такой сценарий, при котором минимизируются собственные выплаты на погашение кредитов и по возможности сокращаются сроки их погашения. При возвращении заемных средств предприятие погашает платежи по процентам в установленные контрактом сроки, а затем, по истечении сроков, выплачивает всю сумму кредита. Вместе с тем могут быть различные варианты расчетов, которые оговариваются в контракте при заключении кредитного соглашения. Например, в контракте может предусматриваться погашение финансовых обязательств с помощью разовых платежей, сумма которых превышает величину необходимых обязательных процентов по полученному кредиту. В этом случае может быть уменьшена сумма заемных средств либо величина выплачиваемых сумм по процентам.

Развитие методов и средств компьютерного моделирования, базирующихся на современных технических и программных средствах, способствует значительному повышению эффективности принимаемых решений по минимизации собственных выплат на погашение кредитов в установленные банком сроки и проценты.

С целью выпуска конкурентоспособной продукции (услуг) судоремонтными предприятиями предлагается алгоритм оптимизации разовых выплат по взятым кредитным обязательствам. Разовые выплаты производятся с учетом получаемых доходов на предприятии и имеющихся финансовых возможностей совета директоров. При этом сумма разовых выплат не может быть меньше текущего процента по кредитному соглашению и больше суммы дохода, получаемого предприятием за определенный период в результате использования приобретенных по кредиту обновленных технических средств.

В вычислительной среде MATLAB в качестве функции квадратичного программирования в оценке ежемесячных платежей по *n* месячному займу использована функция *quadprog*, имеющая синтаксис:

x=quadprog(H,f,A,b,Aeq,beq,lb,ub),

где *H*, *A* и *Aeq* — матрицы, а величины *f*, *b*, *beq*, *lb*, *ub* и *x* — векторы соответствующих размерностей.

В соответствии с приведенным синтаксисом, функция *quadprog*:

— вычисляет вектор *x*, который минимизирует целевую функцию:

$$f(x) = \min_{x} \frac{1}{2} x^T H x + f^T x,$$

при условии выполнения ограничения-неравенства $A \cdot x \le b$;

— решает указанную выше задачу с дополнительным выполнением ограничений типа равенства $Aeq \cdot x = beq$;

— определяет набор нижних и верхних границ для переменной *x* так, чтобы решение располагалось в диапазоне $lb \le x \le ub$.

В матричном виде квадратичная часть целевой *f*(*x*) функции запишется так:

$f(x)$=0.5*x'*H*x,

где H — единичная диагональная матрица размерности (70×70). Матрица Aeq в нашем случае согласно алгоритму является матрицей Крылова. Вектор f принят равным нулю. Свободные члены целевой функции не включаются в вычислительный процесс оператором *quadprog* и учитываются отдельно.

Рассмотрим применение алгоритма в ситуации, когда инвестиции в процесс замены оборудования составляют 18 млн долл. США под процентную ставку i % годовых при следующих значениях матриц A и B (см. уравнение (1)):

$$A = 1 + (i/(12 \cdot 100)) \text{ и } B = -1.$$

Исходные данные для расчета:

— объем инвестиций $x(0)$ = 18 млн долл. США;

— время выплаты (в месяцах) n = 70 (5 лет и 10 мес.);

— сценарии при процентных ставках годовых: 5, 6, 7, 8, 9 %;

— остаточная сумма на момент окончания времени выплат $x(n)$ = 0.

Получены следующие результаты расчета по предложенному алгоритму в формате bank при годовой ставке i=8,5 %:

```
U =
  Columns 1 through 4
    404788.58     401941.49     399114.43     396307.25
  Columns 5 through 8
    393519.82     390752.00     388003.64     385274.61
  Columns 9 through 12
    382564.77     379874.00     377202.15     374549.10
  Columns 13 through 16
    371914.70     369298.83     366701.37     364122.17
  Columns 17 through 20
    361561.11     359018.06     356492.91     353985.51
  Columns 21 through 24
    351495.75     349023.50     346568.64     344131.04
  Columns 25 through 28
    341710.59     339307.17     336920.64     334550.91
  Columns 29 through 32
    332197.84     329861.32     327541.24     325237.47
  Columns 33 through 36
    322949.91     320678.44     318422.94     316183.31
  Columns 37 through 40
    313959.43     311751.19     309558.49     307381.21
  Columns 41 through 44
    305219.24     303072.47     300940.81     298824.14
  Columns 45 through 48
    296722.35     294635.35     292563.03     290505.29
  Columns 49 through 52
    288462.01     286433.11     284418.48     282418.02
  Columns 53 through 56
    280431.63     278459.21     276500.66     274555.89
  Columns 57 through 60
    272624.80     270707.29     268803.27     266912.64
  Columns 61 through 64
    265035.30     263171.17     261320.16     259482.16
  Columns 65 through 68
```

257657.09 255844.85 254045.36 252258.53
Columns 69 through 70
250484.27 248722.49/
Zopt= sum(U) = \$ 22437648.61

где *U*, *Zopt* — оптимальные значения разовых платежей по окончании каждого месяца и сумма разовых выплат при погашении кредита (i=8.5%).

Сравнение результатов. Заметим, что величины *U* отличаются от периодического платежа по займу или аннуитету, который представляет собой постоянное число, определяемое по формулам сложных процентов с учетом времени выплат, размеров инвестиций и годовой процентной ставки. Вычисление размера ежемесячных платежей в этом случае можно выполнить с помощью стандартных функций финансовой аналитики среды MATLAB, в частности посредством функции payper со следующим синтаксисом:

$$pint = payper\,(rate, nper, pv, fv, due), \tag{8}$$

где *pmt* — размер ежемесячного периодического платежа;

rate — периодическая процентная ставка (десятичное дробное число, большее или равное нулю);

nper — число периодов (месяцев) на протяжении срока финансового инструмента;

pv — текущая стоимость финансового инструмента;

fv — значение будущей или остаточной балансовой стоимости финансового инструмента по прошествии *nper* периодов;

due — указатель момента платежей:

0 — конец периода, 1 — начало периода.

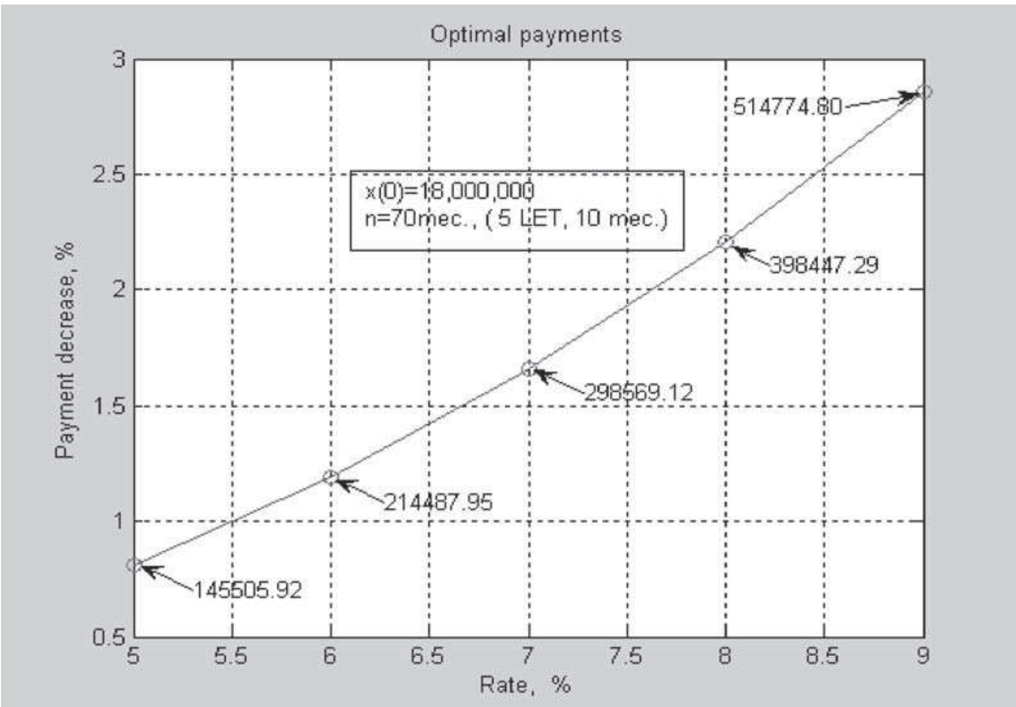

Рис. 1. Уменьшение объема выплат по займу в зависимости от годовой ставки процента при оптимальном управлении

Оптимальный режим характеризуется изменениями от шага к шагу размера ежемесячных платежей, за счет чего достигается снижение объема выплат:

при годовой ставке 5 % — на 0.81 %,
при годовой ставке 6 % — на 1.19 %,
при годовой ставке 7 % — на 1.66 %,
при годовой ставке 8 % — на 2.21 %,
при годовой ставке 9 % — на 2.86 %.

В долларах сокращения размеров выплат составляют:
145505.92,
214487.95,
298569.12,
398447.29,
514774.80,
что свидетельствует о целесообразности реализации «мягкого» режима ежемесячных платежей при значительных размерах ставок и продолжительном времени выплат по инвестициям (рис. 1).

Таким образом, на основе представленного вычислительного алгоритма и программы в кодах MATLAB возможно оперативно осуществлять выбор такого сценария, при котором минимизируются собственные выплаты на погашение кредитов, а также сокращаются сроки их погашения.

Список литературы

1. *Крылов А. Н.* О численном решении уравнения, которым в технических вопросах определяются частоты малых колебаний материальных систем / А. Н. Крылов // Изв. АН СССР. — 1931.
2. *Уоткинс Д. С.* Основы матричных вычислений / Д. С. Уоткинс. — М.: БИНОМ: Лаб. знаний, 2006. — 664 с.
3. *Сахаров В. В.* Применение матрицы Крылова для апериодического управления динамическими объектами / В. В. Сахаров, В. И. Королев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — Вып. 1 (9).
4. *Сахаров В. В.* Совершенствование управления качеством сборки судовых механизмов в судоремонте / В. В. Сахаров, А. А. Кузьмин. — СПб.: Судостроение, 2012. — 202 с.

УДК 531

Б. Ф. Клочков,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ НЕРАВНОЖЕСТКОГО РОТОРА В УПРУГИХ ОПРОРАХ

STABILITY OF VARIOUS STIFFNESS ROTOR MOTION IN ELASTIC SUPPORTS

Исследована устойчивость движения неравножесткого ротора при трех вариантах конструкции его опор. Определена оптимальная схема ротора с невращающимися упругими опорами.