

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 519.673:62–83

А. С. Коваль, канд. техн. наук, доц., А. В. Шваяков

К ВОПРОСУ СИНТЕЗА ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ КАБИНЫ ЛИФТОВОЙ УСТАНОВКИ

В статье рассматривается вопрос синтеза линейно-квадратичного регулятора для управления положением кабины лифтовой установки. Рассматривается синтез классических систем подчиненного регулирования с учетом особенностей лифтовой установки. Выполнено математическое описание объекта управления в пространстве состояний. Показана структура линейно-квадратичного регулятора и алгоритм синтеза. Представлены результаты расчета переходных процессов.

Для приводов главного движения лифтовых установок широко применяется асинхронный электропривод с вольт-частотным и векторным управлением. Причем векторные системы управления применяются в установках с повышенными требованиями по точности и динамике. Как правило, системы управления главного движения строятся по принципу подчи-

ненного регулирования (рис. 1) с контурами управления моментом (током) и скоростью [1, 2], а для обеспечения точной остановки в этих системах может применяться дополнительный внешний контур управления положением, действующий постоянно или только при подходе к точке останова [1].

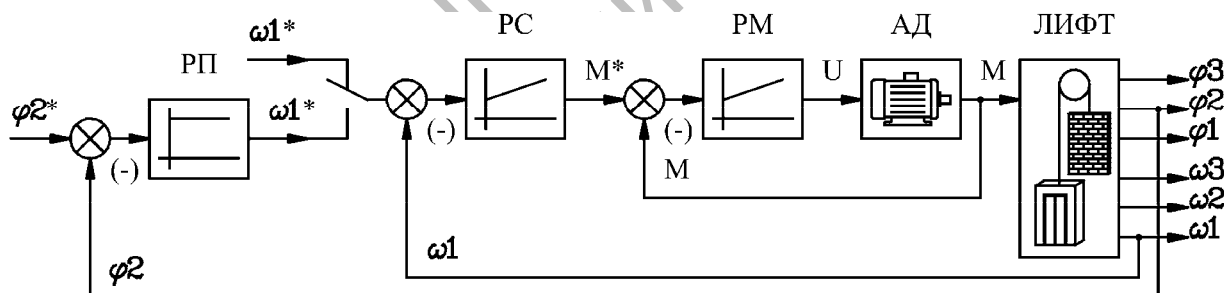


Рис. 1. Функциональная схема системы управления электроприводом лифтовой установки

В системах управления (рис. 1) синтез регулятора скорости выполняется с учетом резонансных явлений, имеющих место в механической части лифтовой установки [3]. Частота среза контура управления скоростью выбирается левее первой частоты резонансных всплесков [3, 4], составляющей 1...2 Гц для рассматриваемых установок. Снизить требования к частоте среза контура управления скоро-

стью можно, ограничив скорость изменения сигнала задания скорости. Такой подход позволяет получить качественный переходной процесс по скорости только для достаточно медленных оптимальных тахограмм, что характерно для лифтовых установок [1, 2]. Дополнительный контур управления по положению, обеспечивающий приемлемый уровень ошибки позиционирования, бу-

дет обладать ещё меньшей частотой среза и, таким образом, накладывать еще большие ограничения на скорость изменения оптимальной тахограммы.

При синтезе систем управления по положению кабины лифтовой установки возможен подход, основанный на методе пространства состояний [5–15]. В этом случае объект управления описывается системой (1).

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t); \\ y(t) &= \mathbf{C}x(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(t)$ – вектор-столбец переменных пространства состояний; $u(t)$ – вектор-столбец сигналов задания; $y(t)$ – вектор-столбец сигналов выходов; \mathbf{A} – матрица коэффициентов системы; \mathbf{B} – матрица входа; \mathbf{C} – матрица выхода.

Вектор переменных пространства состояний и вектор сигналов задания определяются по (2) и (3) соответственно.

$$x(t) = [\omega_1(t) \ \omega_2(t) \ \omega_3(t) \ \varphi_1(t) \ \varphi_2(t) \ \varphi_3(t)]^T; \quad (2)$$

$$u(t) = [M(t) \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (3)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – приведенные к общему валу угловые скорости вращения двигателя, лифта, противовеса соответственно, рад/с; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – положение двигателя, кабины лифта и противовеса, град; M – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Переходные процессы в лифтовой установке с высотой подъема до 150 м с достаточной точностью могут быть описаны трехмассовой консервативной системой [1, 17]. Тогда матрицы \mathbf{A} , \mathbf{B} и \mathbf{C} определяются (4), (5) и (6) соответственно.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & -(C_{12} + C_{13}) \cdot J_1^{-1} & C_{12} \cdot J_1^{-1} & C_{13} \cdot J_1^{-1} \\ & C_{12} \cdot J_2^{-1} & -C_{12} \cdot J_2^{-1} & 0 \\ & C_{13} \cdot J_3^{-1} & 0 & -C_{13} \cdot J_3^{-1} \\ \mathbf{J}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = [J_1^{-1} \ \mathbf{0}_{1 \times 5}]^T; \quad (5)$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{J}_{6 \times 6}], \quad (6)$$

где $\mathbf{0}_{n \times n}$ – нулевая матрица $n \times n$; $\mathbf{J}_{n \times n}$ – единичная диагональная матрица $n \times n$; C_{12}, C_{13} – коэффициенты жесткости при кручении связей, Н·м/рад; J_1, J_2, J_3 – приведенные к общему валу моменты инерции двигателя, лифта, противовеса соответственно, кг·м².

Рассмотрим особенности проектирования линейно-квадратичного регулятора (ЛКР) для лифтовой установки с электроприводом при прямом управлении моментом с широтно-импульсным модулятором (ПУМ–ШИМ). Математическое описание электропривода при ПУМ–ШИМ представлено в [18, 19]. Задача синтеза ЛКР заключается в отыскании коэффициентов обратных связей \mathbf{K} таких, что закон (7) минимизирует квадратичный критерий качества (8) [6–15].

$$u = -\mathbf{K}x, \quad (7)$$

где \mathbf{K} – вектор коэффициентов.

$$J(u) = \int_0^{\infty} (x^T \mathbf{Q}x + u^T \mathbf{R}u + 2x^T \mathbf{N}u) dt. \quad (8)$$

где $\mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{N}$ – матрицы весовых коэффициентов [6, 12, 13, 16].

Таким образом, значения коэффициентов \mathbf{K} определяются по (9).

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{N}^T), \quad (9)$$

где \mathbf{S} решение (10) [6, 11, 14].

$$\begin{aligned} &\mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} - (\mathbf{S} \mathbf{B} + \mathbf{N}) \mathbf{R}^{-1} \times \\ &\times (\mathbf{B}^T \mathbf{S} + \mathbf{N}^T) + \mathbf{Q} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Потребуем, чтобы ЛКР обладал интегрирующими свойствами. Для этого введем в вектор-столбец переменных пространства состояний (2) дополнительную переменную $i(t)$. Тогда (2) примет вид:

$$x(t) = [\omega_1(t) \dot{e}(t) \omega_3(t) \varphi_1(t) e(t) \varphi_3(t) i(t)]^T, \quad (11)$$

где e – ошибка управления (12), рад; \dot{e} – производная ошибки управления (13), рад/с.

$$e \triangleq \varphi_2 - \varphi_2^*. \quad (12)$$

$$A = \begin{bmatrix} - (C_{12} + C_{13}) \cdot J_1^{-1} & C_{12} \cdot J_1^{-1} & C_{13} \cdot J_1^{-1} & & \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & C_{12} \cdot J_2^{-1} & -C_{12} \cdot J_2^{-1} & 0 & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ & C_{13} \cdot J_3^{-1} & 0 & -C_{13} \cdot J_3^{-1} & \\ \mathbf{J}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 3} & & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$B = [J_1^{-1} \quad \mathbf{0}_{1 \times 6}]^T; \quad (15)$$

$$C = [J_{7 \times 7}], \quad (16)$$

где φ_2^* – сигнал задания положения кабины, град.

Матрицы **A**, **B** и **C** будут определяться по (14)...(16) соответственно.

Функциональная схема электропривода (ЭП) при ПУМ-ШИМ с ЛКР показана на рис. 2. Структура ЛКР представлена на рис. 3.

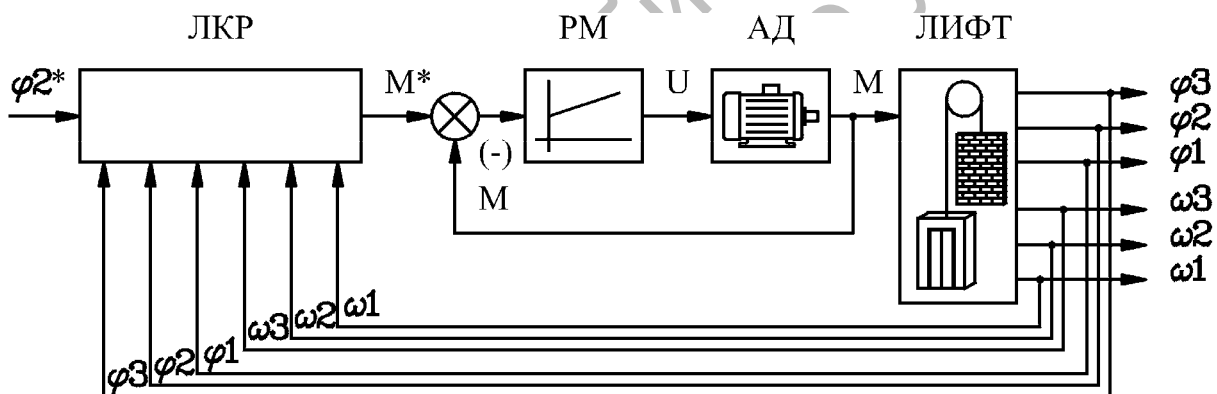


Рис. 2. Функциональная схема системы управления ЭП лифтовой установки с ЛКР

Устойчивость системы управления определим по расположению полюсов. Расположение полюсов объекта управления (табл. 1) показано на рис. 4, а. Расположение полюсов замкнутой системы управления показано на рис. 4, б.

Видно (рис. 4), что объект управления находится на границе устойчивости [20], а система управления, является устойчивой, т.к. вещественные части корней отрицательные [5, 15, 20].

Измерить все переменные, необходимые для работы ЛКР, проблематично.

Однако получить информацию о текущем значении переменной пространства состояний возможно при помощи наблюдателя. Уравнение, описывающее наблюдатель, имеет вид [6, 21–24]:

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)), \quad (17)$$

где \hat{x} – вектор-столбец восстановленных переменных пространства состояний; **L** – матрица коэффициентов усиления наблюдателя; **D** – матрица обхода.

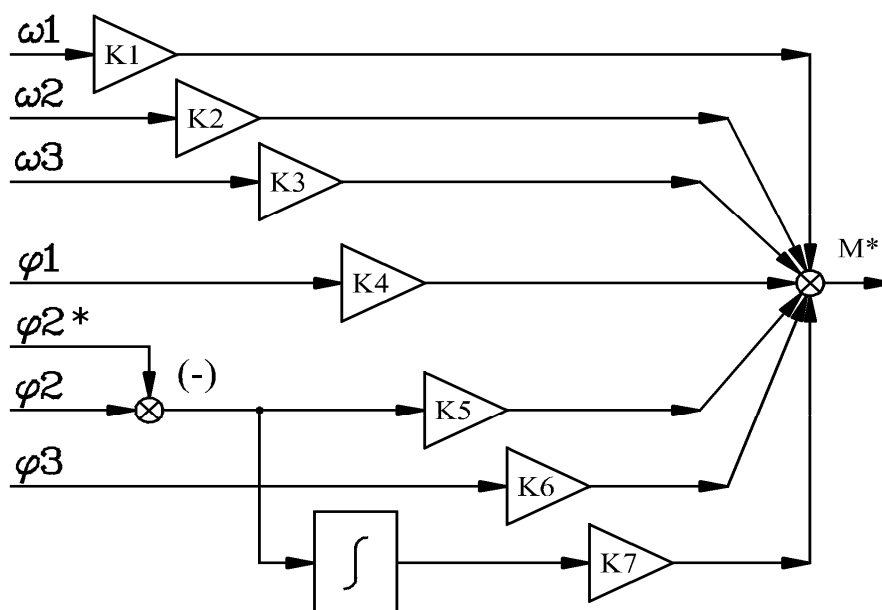


Рис. 3. Структурная схема ЛКР

Табл. 1. Параметры лифтовой установки

Параметры	Значение
1	2
<i>Параметры лифта</i>	
Грузоподъемность, кг	630
Скорость, м/с	1,6
Масса пустой кабины, кг	1300
Масса противовеса, кг	1615
Высота подъема, м	85
<i>Параметры лебедки</i>	
Передаточное число редуктора	18
Диаметр канатоведущего шкива, м	0,55
<i>Параметры канатов</i>	
Число канатов	4
Диаметр канатов, мм	10
Модуль упругости стального каната, кг·с/см ²	1,25·10 ⁶
<i>Параметры асинхронного двигателя</i>	
Мощность двигателя, кВт	13
Номинальный ток, А	28
Пусковой момент, Н·м	250
Частота вращения, об/мин	970
Момент инерции ротора, кг·м ²	0,15

Окончание табл. 1

1	2
<i>Объект управления</i>	
Частота первого резонанса, рад/с	6,58
Частота второго резонанса, рад/с	71,50
Частота первого антирезонанса, рад/с	5,38
Частота второго антирезонанса, рад/с	45,1

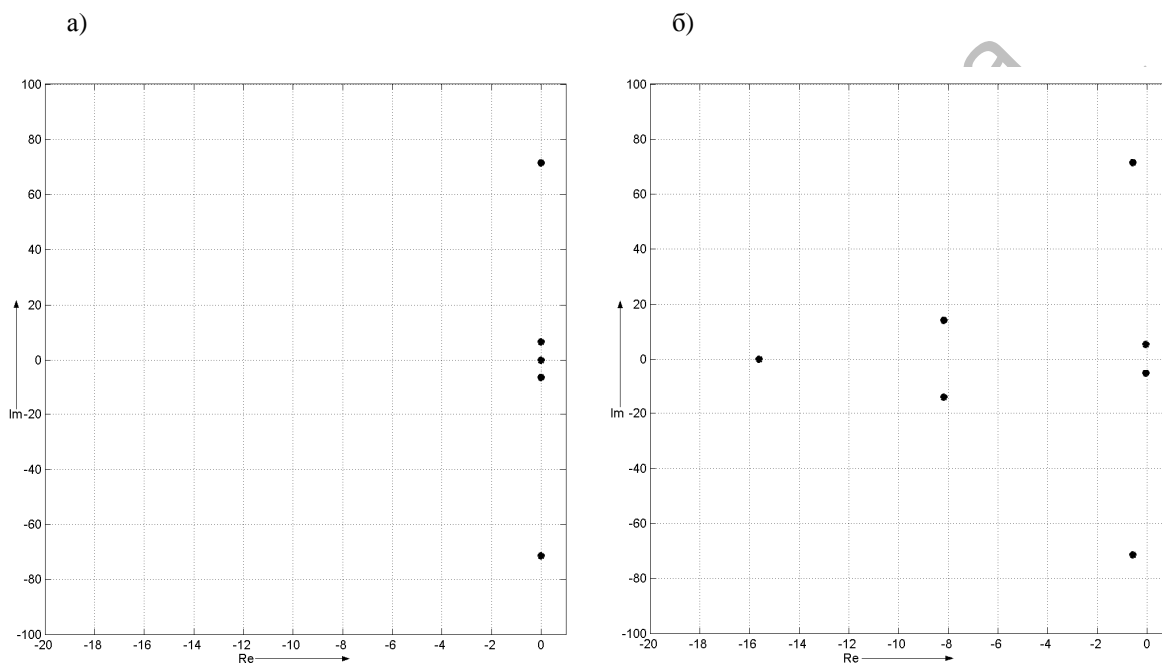


Рис. 4. Расположение полюсов объекта управления и системы управления с ЛКР

Наблюдатель (17) в системе управления (рис. 5) выполняет восстановление скорости противовеса (ω_3) по следующим сигналам: задание момента (M^*), скорость двигателя (ω_1), скорость кабины лифта (ω_2), положение двигателя (φ_1) и положение кабины (φ_2). Переменные φ_1 , φ_2 вычисляются путем интегрирования сигналов скорости ω_1 и ω_2 .

Наблюдатель (17), синтезированный для объекта управления (14)...(16), является устойчивым (рис. 6, а). Замкнутая система управления с наблюдателем также является устойчивой (рис. 6, б).

Видно (см. рис. 6, б), что полюса замкнутой системы управления с наблю-

дателем содержат полюса системы управления (см. рис. 4, б) и наблюдателя (см. рис. 6, а).

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) и логарифмическая фазочастотная характеристика (ЛФЧХ) передаточной функции (18) показаны на рис. 7.

$$W(p) = \frac{\varphi_2(p)}{\varphi_2^*(p)}, \quad (18)$$

где $W(p)$ – передаточная функция от сигнала задания положения до сигнала положения.

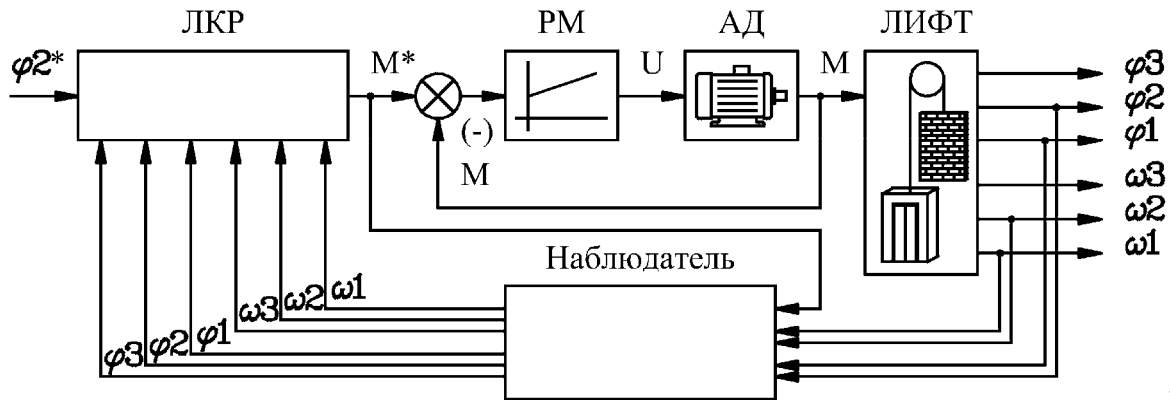


Рис. 5. Функциональная схема системы управления электроприводом лифтовой установки с ЛКР и наблюдателем пространства состояний

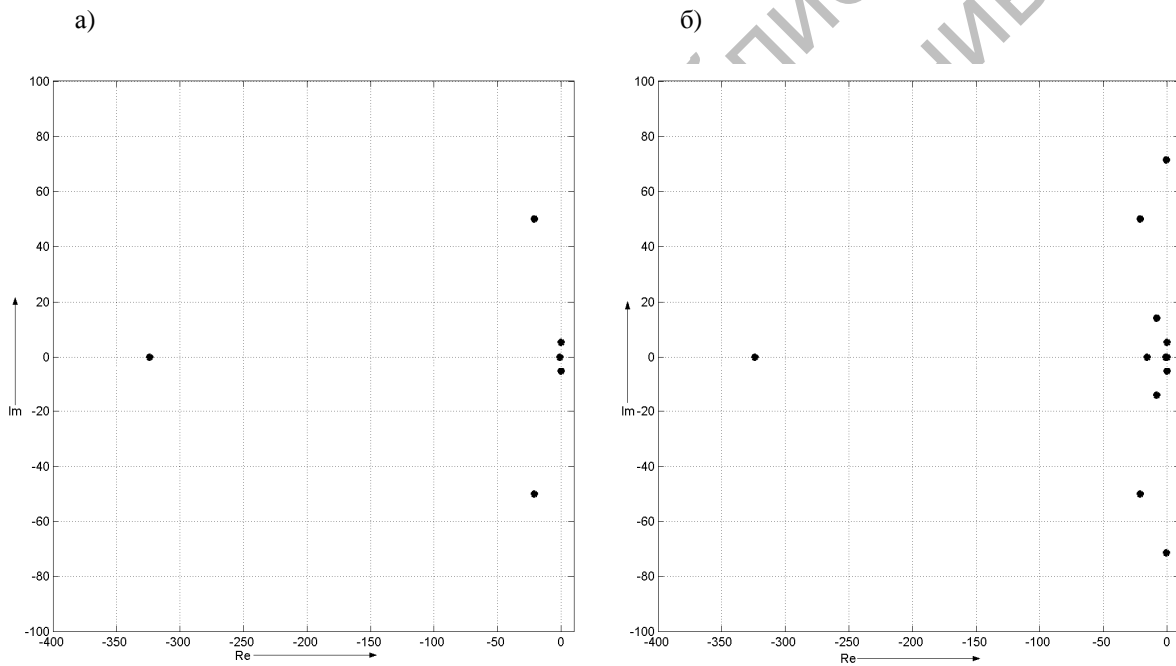


Рис. 6. Расположение полюсов наблюдателя и системы управления с ЛКР и наблюдателем

Переходные процессы обработки оптимальной тахограммы в системе управления лифтовой установкой с ЛКР показаны на рис. 8.

Таким образом, выполнено описание объекта управления (лифтовой установки) в пространстве состояний с учетом ограничений на измеряемые координаты. Предложен наблюдатель переменных про-

странства состояний недоступных для измерения. Показано, что замкнутая система управления с наблюдателем является устойчивой. Полоса пропускания, полученной системы управления, значительно превосходит полосу пропускания системы управления, построенной по принципу подчиненного регулирования.

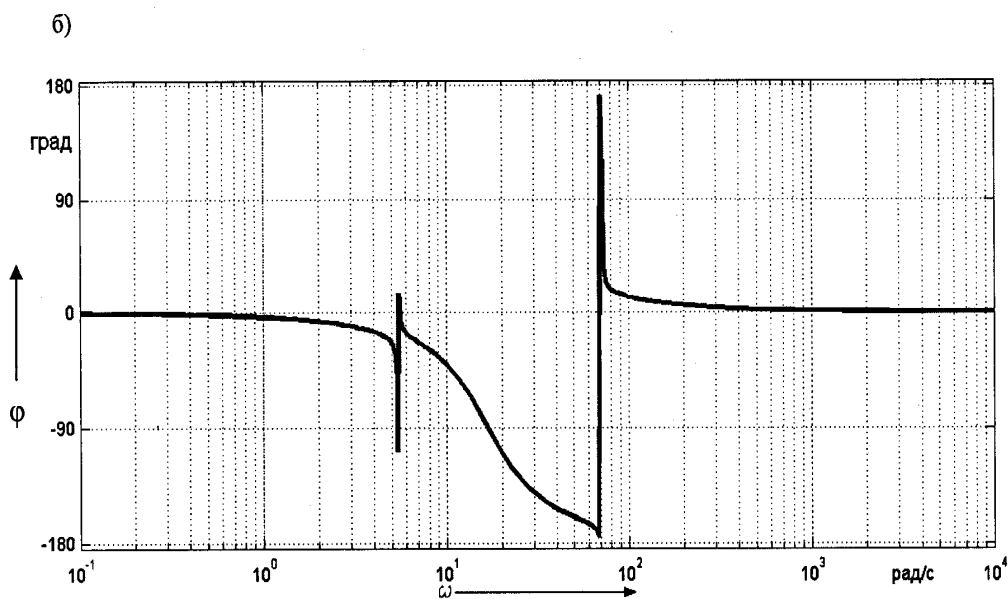
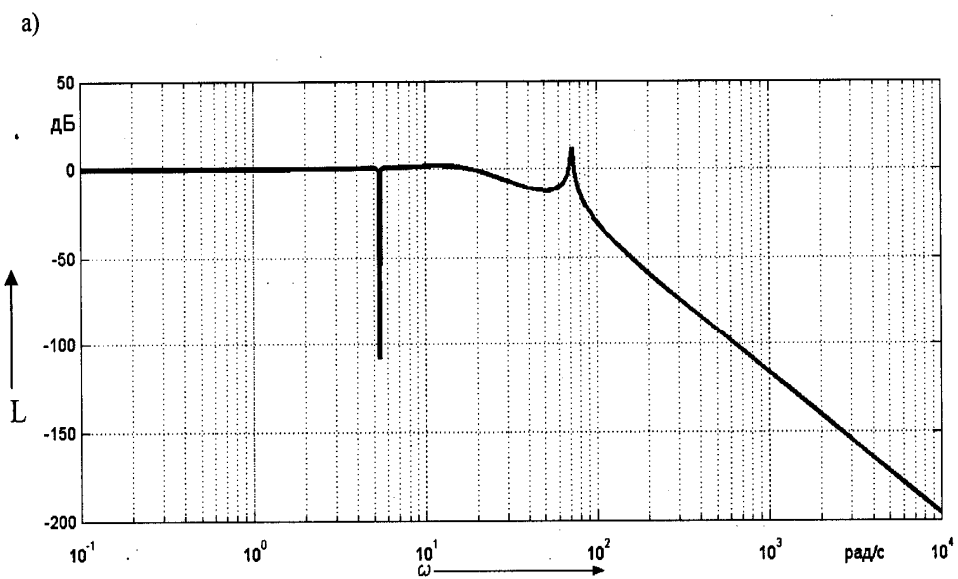


Рис. 7. Частотные характеристики передаточной функции (18): а – ЛАЧХ; б – ЛФЧХ

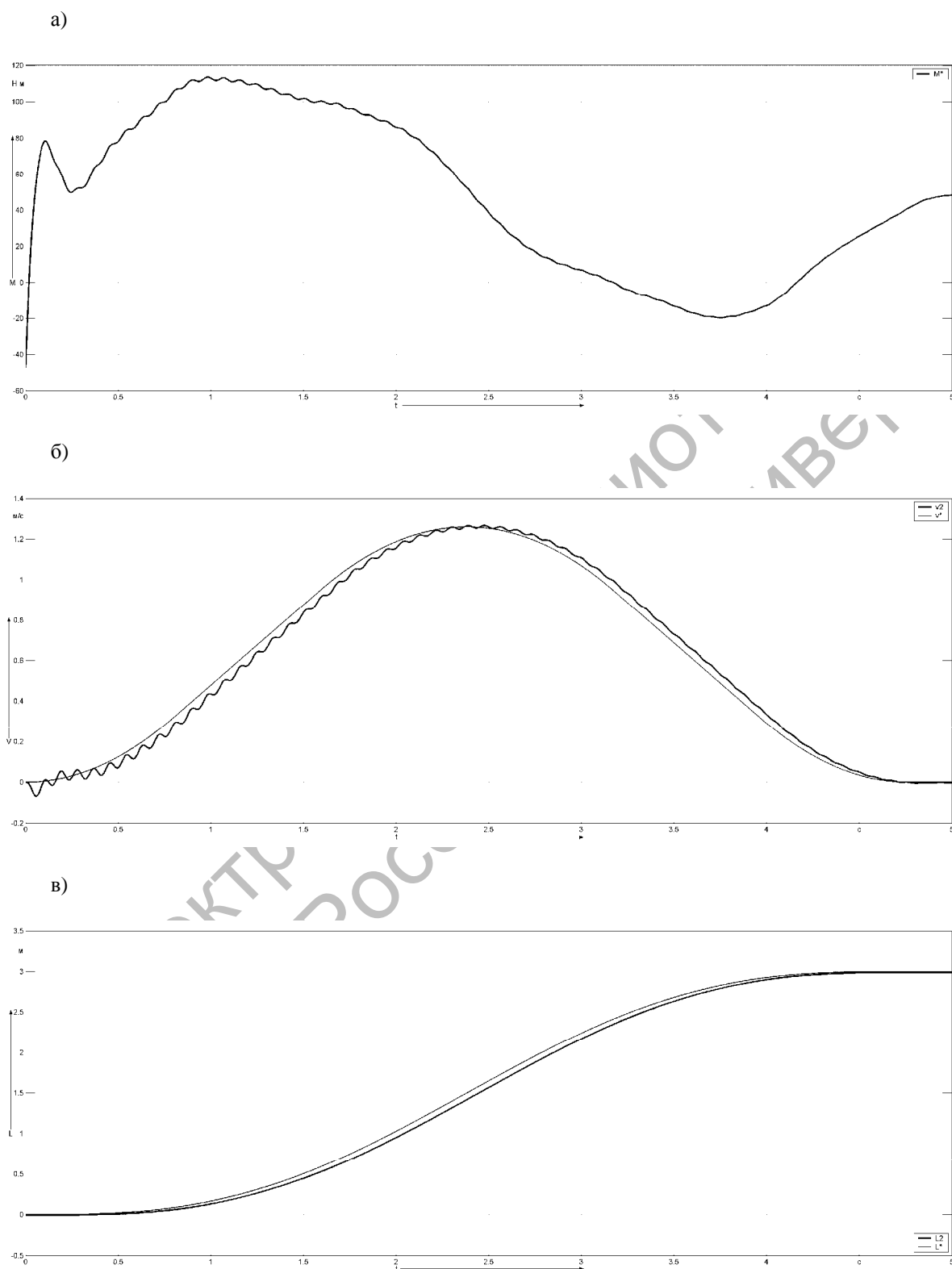


Рис. 8. Графики переходных процессов: а – график переходного процесса момента двигателя; б – график переходного процесса по линейной скорости кабины лифта; в – график переходного процесса по положению при отработке оптимальной тахограммы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лифты : учебник для вузов / Под общ. ред. Д. П. Волкова. – М. : АСВ, 1999. – 480 с. : ил.
2. **Чутчиков, П. И.** Электрооборудование лифтов массового применения / П. И. Чутчиков, Н. И. Алексеев, А. К. Прокофьев – М. : Машиностроение, 1983. – 168 с. : ил.
3. **Ключев, В. И.** Ограничение динамических нагрузок электропривода / В. И. Ключев. – М. : Энергия, 1971. – 320 с. : ил.
4. **Борцов, Ю. А.** Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Энергоатомиздат, 1992. – 288 с. : ил.
5. **Гудвин, Г. К.** Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. – М. : БИГОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с. : ил.
6. **Anderson, B. D. O.** Optimal control : linear quadratic methods / B. D. O. Anderson, J. B. Moore. – London : Prentice-Hall International, Inc, 1998. – 395 p. : pic.
7. **Ogata, K.** Modern control engineering / K. Ogata. – 3rd ed. – New Jersey, Prentice Hall, Upper Saddle River. – 1015 p. cm.
8. **Paraskevopoulos, P. N.** Modern Control Engineering / P. N. Paraskevopoulos. – New York : CRC Press, 2002. – 736 p. : pic.
9. **Durbin, J.** Time Series Analysis by State Space Methods / J. Durbin, S. J. Koopman. – London : Oxford University Press, 2001. – 253 p. : pic.
10. State Space and Unobserved Component Models / J. Durbin [etc.]. – London : Cambridge University Press, 2004. – 394 p. : pic.
11. **Sima, V.** Algorithms for Linear-Quadratic Optimization / V. Sima. – New York : CRC Press, 1996. – 366 p. : pic.
12. **Петров, Ю. П.** Новые главы теории управления и компьютерных вычислений. – СПб. : БХВ-Петербург, 2004. – 192 с. : ил.
13. **Чернорудский, И. Г.** Методы оптимизации в теории управления : учеб. пособие / И. Г. Чернорудский. – СПб. : Питер, 2004. – 256 с. : ил.
14. **Афанасьев, В. Н.** Математическая теория конструирования систем управления : учебник для вузов / В. Н. Афанасьев, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2003. – 614 с. : ил.
15. **Анхимюк, В. Л.** Проектирование систем автоматического управления электроприводами : учеб. пособие для вузов по спец. «Электропривод и автоматизация промышленных установок». – Минск : Выш. шк., 1986. – 143 с. : ил.
16. **Александрова, И. Е.** О выборе весовых коэффициентов оптимизируемого функционала в теории аналитического конструирования оптимальных регуляторов / И. Е. Александрова, Т. Е. Александрова // Радиотехника. Информатика. Управления. – 2001. – № 1. – С. 135–137.
17. **Чупрасов, В. В.** Исследование динамики электроприводов лифтов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1976.
18. **Коваль, А. С.** К вопросу математического моделирования системы векторного управления при прямом управлении моментом на основе широтно-импульсной модуляции / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 2. – С. 86–93.
19. **Шваяков, А. В.** К вопросу построения упрощенной модели электропривода при ПУМ-ШИМ / А. В. Шваяков, А. С. Коваль // Информационные технологии, энергетика и экономика : межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Смоленск, 12–13 апреля 2007 г. : в 3 т. – Смоленск, 2007. – Т. 1. – С. 160–164.
20. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.
21. **Акимов, А. В.** Обобщенный наблюдатель для систем подчиненного регулирования скорости тиристорных электроприводов с устойчивой и неустойчивой одномассовой механической частью / А. В. Акимов, В. И. Колотило, В. Н. Шамардина // Электротехника. – 1999. – № 5. – С. 12–20.
22. **Дочвири, Д. Н.** Оптимизация динамики тиристорного электропривода с упругим звеном по критериям Калмана-Фробеньюса / Д. Н. Дочвири // Электротехника. – 2004. – № 5. – С. 6–13.
23. **Акимов, А. В.** Синтез наблюдателей состояния для статической СПР скорости двухмассового неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, электромеханического объекта / А. В. Акимов, В. И. Колотило, В. С. Марков // Электротехника. – 2000. – № 6. – С. 37–44.
24. **Houpis, C. H.** Digital control systems: theory, hardware, software / C. H. Houpis, G. B. Lamont. – 2nd ed. – New York : McGraw-Hill, Inc. 1992. – 753.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 21.02.2008

A. S. Koval, A. V. Shvayakov
Synthesis of linearly quadratic regulator
for elevator plant car position control

The question of synthesis of linearly quadratic regulator for elevator plant car position control is considered in the article. Synthesis of common systems of regulation taking into account peculiarities of the elevator plant is described. State space mathematical description of elevator is given. Structure of linearly quadratic regulator and synthesis algorithm are given. Results of transitional processes calculation are presented in the paper.

Электронная библиотека
Белорусско-Российского университета