

УДК 62-83:621.876:004

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

К ВОПРОСУ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПРЯМОМ УПРАВЛЕНИИ МОМЕНТОМ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ МОДУЛЯТОРОМ ЛИФТОВОЙ УСТАНОВКИ

В статье рассмотрены вопросы построения нечеткого регулятора контура скорости редукторного электропривода лифтовой установки. Приведено математическое описание электрической и механической подсистем, а также нелинейностей червячного редуктора. Представлены функции принадлежности, база логических правил и алгоритм логического вывода нечеткого регулятора. Выполнен расчет переходных процессов для классической системы управления и системы управления с нечетким регулятором.

Современные системы управления главного движения лифтовых установок включают асинхронный двигатель (АД) и автономный инвертор напряжения (АИН) [1–3]. Система АИН–АД позволяет построить как системы вольт-частотного управления, так и системы векторного управления, причем последние обладают лучшими статическими и динамическими характеристиками. Функциональная схема системы управления электропривода главного движения показана на рис. 1. Схема включает электрическую и механическую подсистемы. К электрической подсистеме относится система векторного управления при прямом управлении мо-

ментом (ПУМ) с широтно-импульсным модулятором (ШИМ). Система векторного управления имеет внешний контур управления скоростью и два внутренних контура управления: контур управления моментом и контур управления потоком статора. Сигналы с регуляторов потока статора и момента, являясь проекциями вектора напряжения, поступают на ШИМ, который выполняет расчет времени работы каждого силового ключа. Система управления также имеет блоки преобразования систем координат и наблюдатель координат. Математическое описание системы при ПУМ с ШИМ представлено в [4, 5].

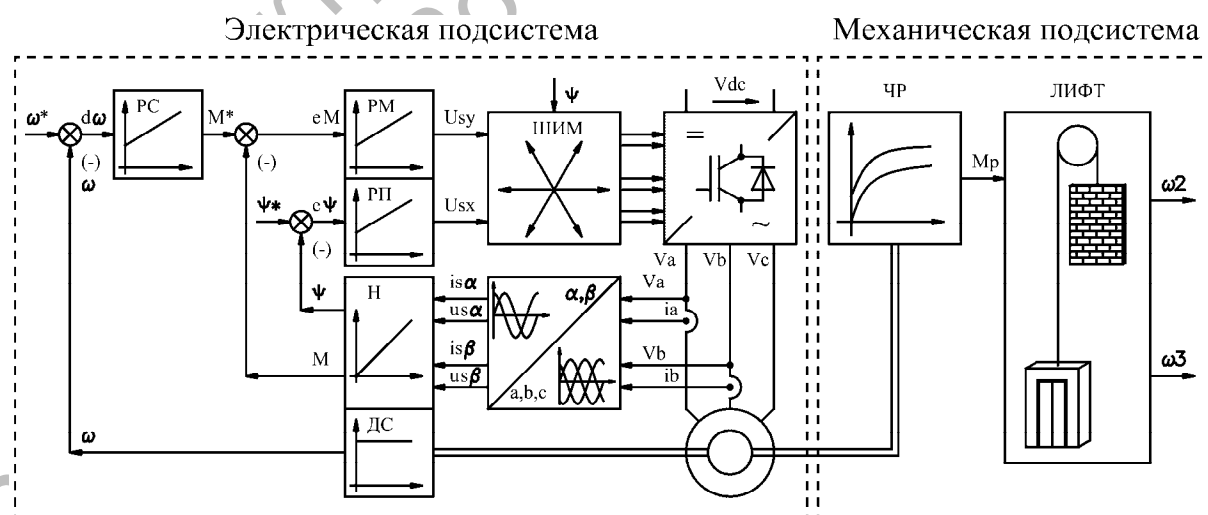


Рис. 1. Функциональная схема модели редукторного электропривода лифтовой установки

Механическая подсистема включает модели червячного редуктора (ЧР) и лифтовой установки (ЛУ). Модель червячного редуктора нелинейная из-за различных значений передаваемой энергии в прямом и обратном направлениях [6, 7, 9]. При прямой передаче энергии – от червяка к колесу – потери энергии в ЧР значительно меньше, чем при обратном. Потери в ЧР учитываются коэффициентом полезного действия (КПД), зависящего от скорости вращения червяка. Обозначим КПД при прямой передаче $\bar{\eta}(\omega_1)$, а при обратной – $\bar{\eta}(\omega_1)$. Для построения математической модели ЧР удобно иметь аналитическое выражение для определения КПД ЧР в функции угловой скорости вращения червяка. Одной из возможных аппроксимирующих функ-

ций может быть функция (1).

$$\bar{\eta}(\omega) = \frac{a \cdot \omega}{b + \omega} + c, \quad (1)$$

где a, b, c – неизвестные коэффициенты; ω – угловая скорость вращения червяка, рад/с.

Значения прямого и обратного КПД связаны соотношением (2) [7].

$$\bar{\eta}(\omega) = 2 - \frac{1}{\bar{\eta}(\omega)}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета прямого и обратного КПД по (1) и (2), там же отмечены «+» и «o» значения прямого и обратного КПД реального редуктора [16].

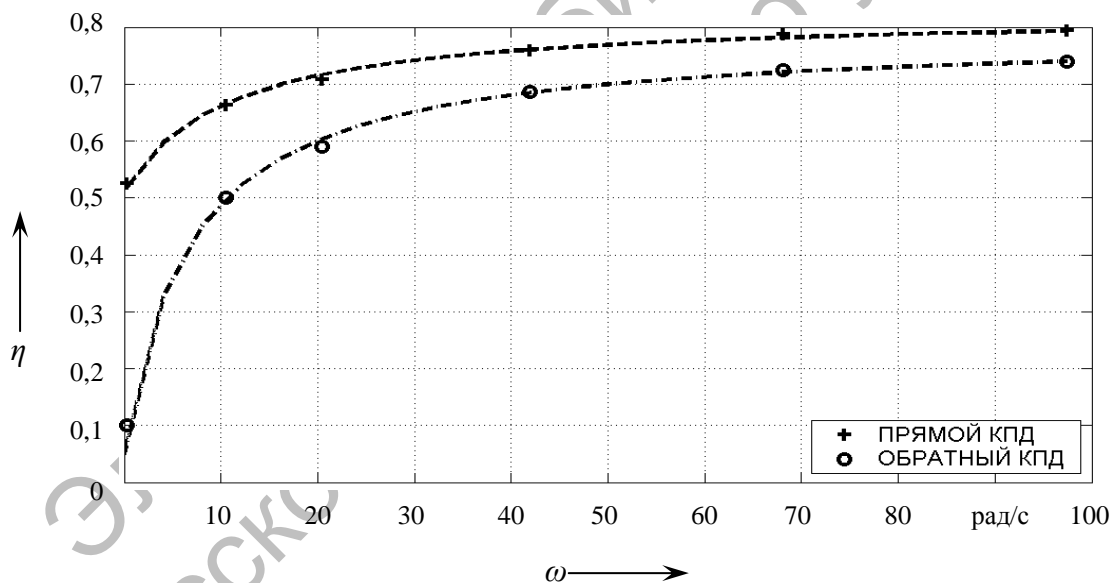


Рис. 2. Зависимости прямого и обратного КПД от скорости червяка

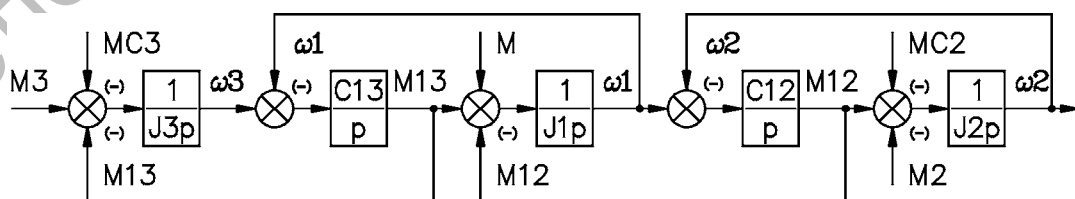


Рис. 3. Структурная схема трехмассовой консервативной системы

В лифтовой установке с высотой подъема до 150 м переходные процессы с достаточной точностью могут быть описаны трехмассовой расчетной схемой, структурная схема которой показана на рис. 3 [7, 8]. Уравнения движения трехмассовой системы описываются системой уравнений

$$\begin{cases} J_1 \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_2 - M_{C2}; \\ J_3 \cdot \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13} - M_{C3}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12} \cdot (\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13} \cdot (\omega_3 - \omega_1), \end{cases} \quad (3)$$

где J_1, J_2, J_3 – приведенные к общему валу моменты инерции двигателя с редуктором, лифта и противовеса соответственно, кг·м²; $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ – приведенные к общему валу угловые скорости вращения двигателя, лифта и противовеса соответственно, рад/с; M – электромагнитный момент двигателя, Н·м; M_{12}, M_{13} – приведенные моменты взаимодействия, Н·м; M_2, M_3 – приведенные к общему валу моменты, обусловленные силой тяжести, Н·м; M_{C2}, M_{C3} – приведенные к общему валу моменты сопротивления, Н·м; C_{12}, C_{13} – коэффициенты жесткости при кручении связей, Н·м/рад.

Систему управления (см. рис. 1) можно рассмотреть упрощенно (рис. 4) [4, 5].

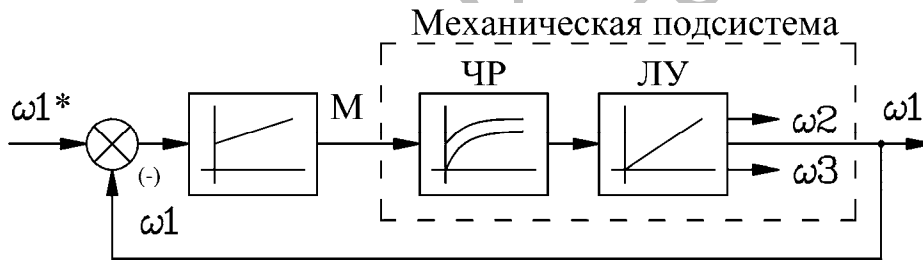


Рис. 4. Упрощенная структурная схема системы управления электроприводом ЛУ

Системы управления скоростью ЛУ, как правило, строятся с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором [7, 8]. Передаточная функция ПИ регулятора скорости в данном случае определяется по (4).

$$W_{PI}(p) = \frac{M(p)}{e(p)} = K_p + \frac{K_I}{p}, \quad (4)$$

где $M(p)$ – изображение момента АД; $e(p)$ – изображение ошибки управления по скорости; K_p – коэффициент усиления пропорциональной части ПИ регулятора; K_I – коэффициент усиления интегральной части ПИ регулятора.

Одним из способов настройки регуляторов является модульный оптимум [10, 11], который для отыскания неизвестных коэффициентов регулятора требует решения уравнения (5).

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{d^m A(\omega)}{d\omega^m} \rightarrow 0, \quad m = 1, 2 \dots n, \quad (5)$$

где $A(\omega)$ – модуль амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы управления; m – порядок производной; ω – частота входного сигнала, рад/с; n – порядок системы управления.

Решение уравнения (5) позволяет

определить соотношение между коэффициентами ПИ регулятора (6).

$$K_I = \frac{2}{3} \cdot \frac{\eta \cdot K_P^2}{T}, \quad (6)$$

где η – значение КПД редуктора; T – постоянная времени объекта управления, с.

Выбор значений K_P и K_I необходимо выполнять с учетом возможных резонансных явлений в механической подсистеме.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) механической подсистемы показана на рис. 5. Значение частоты среза контура управления скоростью выбирается исходя из частоты первого антирезонанса ω_{a1} . При упрощенном описании механической подсистемы значение частоты среза контура управления может быть определено по (7).

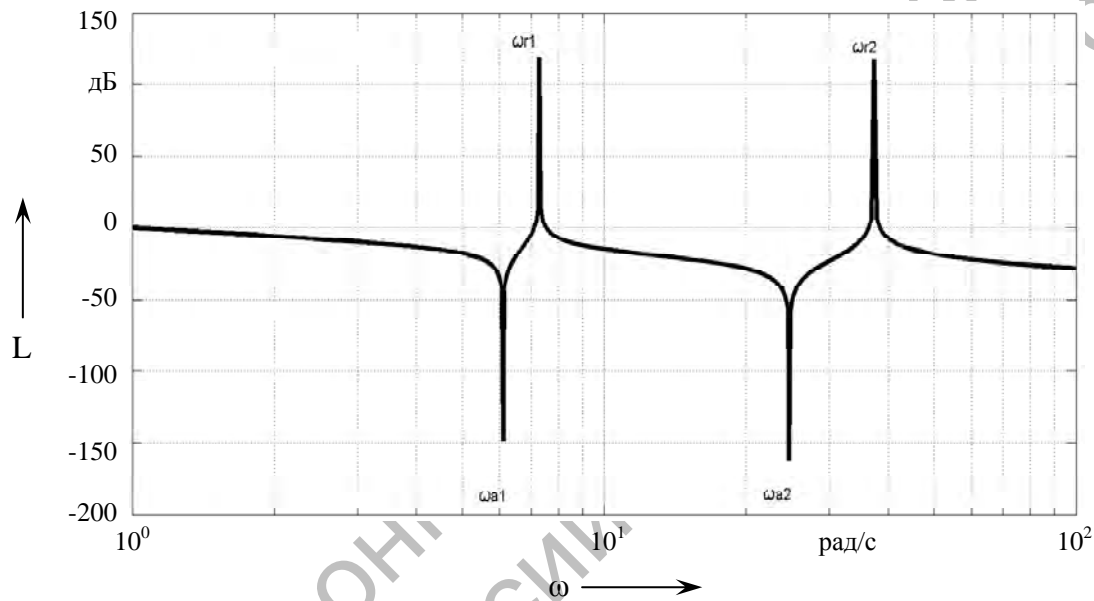


Рис. 5. ЛАЧХ регулятора скорости, объекта управления и разомкнутого контура скорости

$$\omega_c = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\sqrt{K_P^2 \cdot \eta^2 + 2 \cdot K_I \cdot T \cdot \eta + \eta \cdot \sqrt{\eta^2 \cdot K_P^4 + 4 \cdot \eta \cdot K_P^2 \cdot K_I \cdot T + 8 \cdot T^2 \cdot K_I^2}}}{T}, \quad (7)$$

где ω_c – частота среза контура управления скоростью, рад·с⁻¹.

При выполнении соотношения (6) значение частоты среза (7) можно определить по (8).

$$\omega_c = \frac{\eta \cdot K_P}{T} \cdot \sqrt{\frac{7 + \sqrt{65}}{6}} \approx \frac{\eta \cdot K_P \cdot \sqrt{2,5}}{T}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что при фиксированных значениях коэффициентов ПИ регулятора (4) частота среза контура линейно

зависит от значения текущего КПД редуктора.

Настройка на модульный оптимум или другие методы классической теории автоматического управления не предполагают учета нелинейностей ОУ. Одним из способов учета нелинейности ОУ является построение системы управления с нечетким регулятором [14, 15]. Нечеткий регулятор (рис. 6) решает задачу аппроксимации функции изменения значений коэффициентов ПИ регулятора в функции угловой скорости вращения АД.

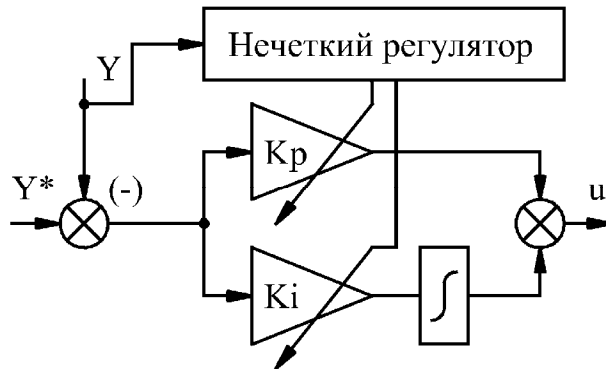


Рис. 6. Структура нечеткого регулятора

Характер изменения коэффициентов ПИ регулятора K_p и K_i одинаков и отличается лишь скоростью изменения. Например, закон изменения коэффициента K_p ПИ регулятора имеет вид:

$$K_p(\omega) = \frac{\omega_c^* \cdot T}{\eta(\omega) \cdot \sqrt{2,5}}, \quad (9)$$

где $K_p(\omega)$ – закон изменения коэффициен-

та K_p ПИ регулятора; ω_c^* – заданная частота среза, рад·с⁻¹.

На рис. 7 показано изменение коэффициента K_p в функции угловой скорости вращения АД.

Структура НР показана на рис. 8 [12–15]. НР характеризуется входными и выходными функциями принадлежности, базой логических правил и нечетким логическим выводом.

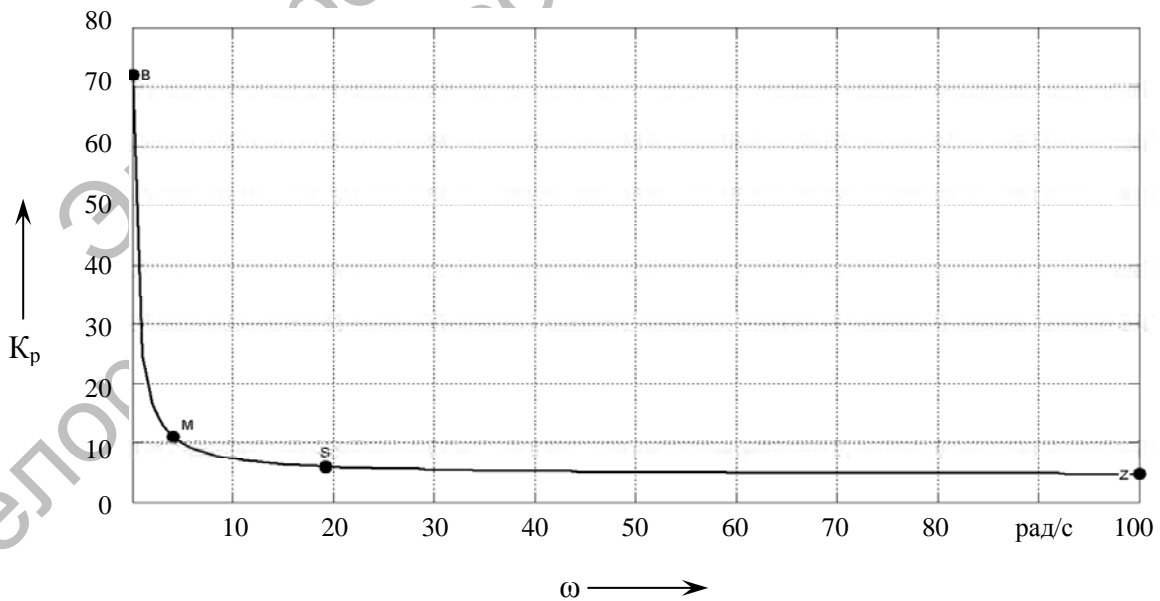


Рис. 7. Изменение коэффициента K_p в функции угловой скорости



Рис. 8. Структура нечеткого регулятора

Входные и выходные функции принадлежности показаны на рис. 9 и 10 соответственно. Входные функции принадлежности являются треугольными и трапециевидными функциями и могут быть описаны аналитически в соответствии с (10) и (11) соответственно [12–15].

$$f_{\Delta}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (10)$$

где a, b, c – некоторые числовые парамет-

ры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные соотношением $a \leq b \leq c$.

$$f_{\Gamma}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}, \quad (11)$$

где a, b, c, d – некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные соотношением $a \leq b \leq c \leq d$.

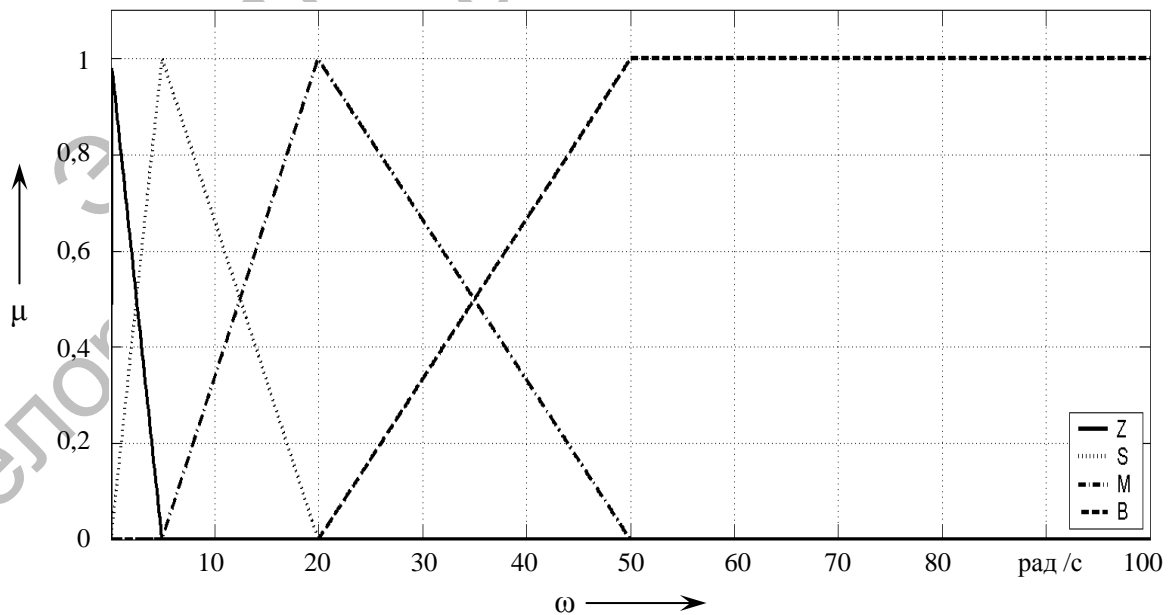


Рис. 9. Графики функций принадлежности входной переменной ω

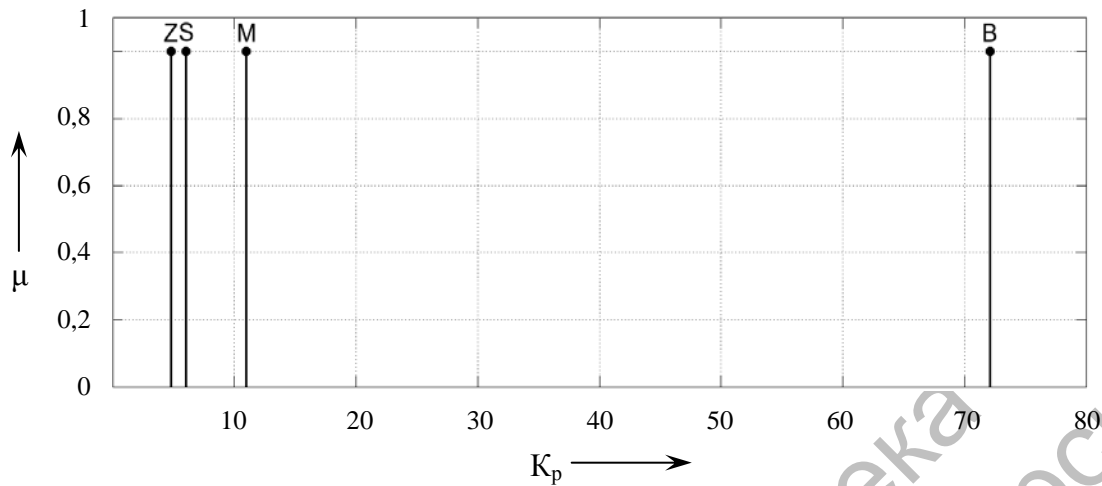


Рис. 10. Графики функций принадлежности выходной переменной K_p

Нечеткий логический вывод выполняется в соответствии с базой правил (рис. 11).

ω	Z	S	M	B
K_p	B	M	S	Z

Рис. 11. База логических правил

Исходными данными для составления базы логических правил являются опорные точки, отмеченные на рис. 7. Так как термы выходных переменных являются одноточечными множествами, то нечеткий логический вывод типа Мамдани или типа Сугено будет идентичным и определяться по формуле (12) [12–15]:

$$y = \frac{\sum_{k=1}^N w_k \cdot y_k}{\sum_{k=1}^N w_k}, \quad (12)$$

где y – значение выходной переменной нечеткого логического модуля; w_k – активность правила, равная значению функции принадлежности и определяемая

по (13); y_k – значение одноточечного множества (см. рис. 10).

$$w_k = \{\mu_Z(\omega) \quad \mu_S(\omega) \quad \mu_M(\omega) \quad \mu_B(\omega)\}, \quad (13)$$

где $\mu_Z(\omega)$, $\mu_S(\omega)$, $\mu_M(\omega)$, $\mu_B(\omega)$ – функции принадлежности входной лингвистической переменной (см. рис. 9).

Выполним расчет переходных процессов в системе с НР и классическим регулятором для лифтовой установки с параметрами, приведенными в табл. 1. На рис. 12 показаны переходные процессы отработки оптимальной тахограммы движения.

Переходные процессы отработки оптимальной тахограммы движения как скорости вращения АД, так и скорости перемещения кабины лифта, представленные на рис. 12, показывают, что переходные процессы в редукторном электроприводе с НР протекают лучше, особенно на низких скоростях вращения. Улучшение качества отработки тахограммы движения достигнуто посредством применения НР, выполняющего изменение коэффициентов классического ПИ регулятора для компенсации нелинейностей червячного редуктора.

Табл. 1. Параметры лифтовой установки

Параметры	Значение
<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

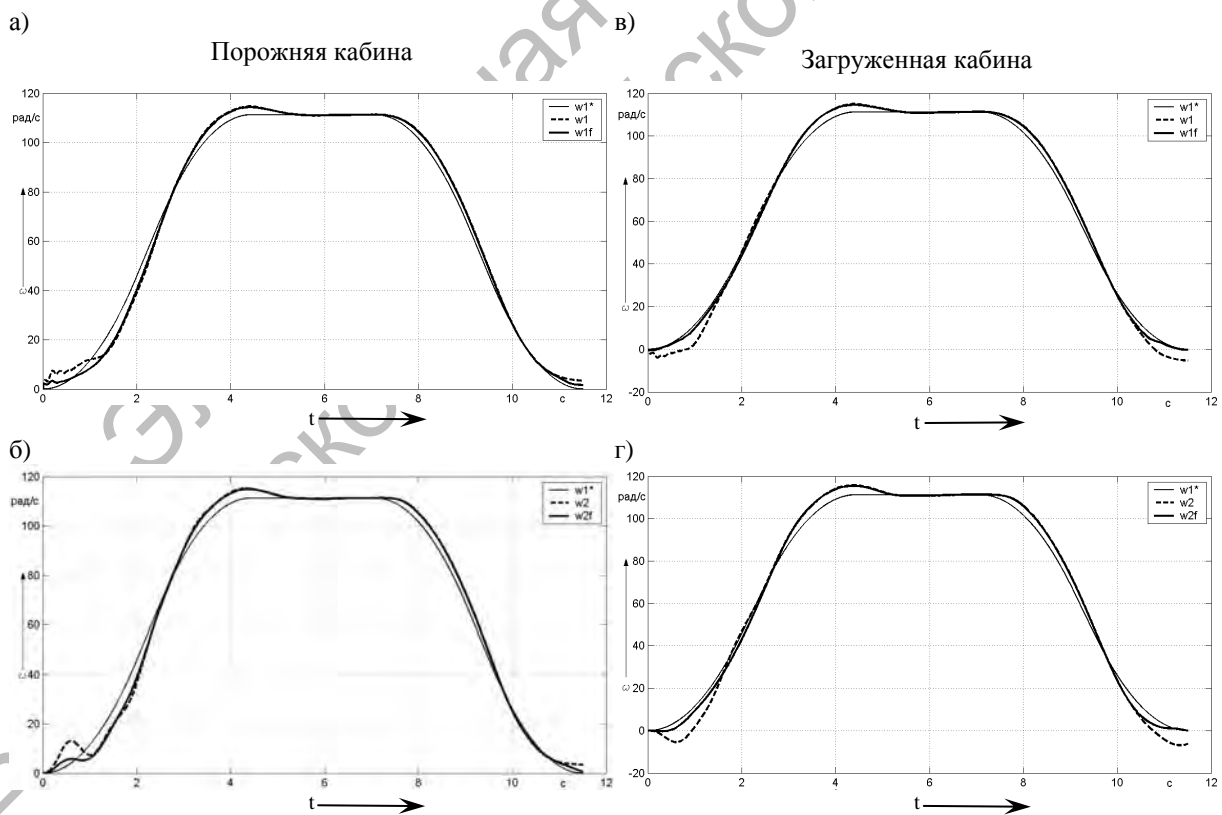


Рис. 12. Графики переходных процессов скорости: а, б – переходные процессы скорости двигателя и кабины при порожней кабине; в, г – переходные процессы скорости двигателя и кабины при загруженной кабине; $\omega 1^*$ – сигнал задания скорости; $\omega 1$, $\omega 2$ – сигналы скорости АД и кабины лифта в системе с классическим регулятором; $\omega 1f$, $\omega 2f$ – сигналы скорости АД и кабины лифта в системе с НР

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Афонин, В. И.** Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями / В. И. Афонин, И. Н. Балабанов // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 37–42.
2. **Макаров, Л. Н.** Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности / Л. Н. Макаров // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 42–46.
3. **Андрианов, М. В.** Выбор преобразователя частоты для применения в лифтовом электроприводе с асинхронным двигателем / М. В. Андрианов, В. И. Афонин, Р. В. Родионов // Приводная техника. – 2007. – № 2. – С. 32–36.
4. **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. 90–97.
5. **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 : в 3 т. – Смоленск, 2007. – Т. 1. – С. 160–164.
6. **Скойбеда, Т. А.** Детали машин и основы конструирования : учебник / Т. А. Скойбеда, А. В. Кузьмин, Н. Н. Макейчик ; под общ. ред. А. Т. Скойбеды. – Минск : Выш. шк., 2000. – 584 с. : ил.
7. **Лифты** : учебник для вузов / Под общ. ред. Д. П. Волкова – М. : АСВ, 1999. – 480 с. : ил.
8. **Чутчиков, П. И.** Электрооборудование лифтов массового применения / П. И. Чутчиков, Н. И. Алексеев, А. К. Прокофьев – М. : Машиностроение, 1983. – 168 с. : ил.
9. **Левитан, Ю. В.** Червячные редукторы : справочник / Ю. В. Левитан, В. П. Обморнов, В. И. Васильев. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 168 с. : ил.
10. **Киселев, Н. В.** Электропривод с распределенными параметрами / Н. В. Киселев, В. Н. Мязель, Л. Н. Рассудов. – Л. : Судостроение, 1985. – 220 с. : ил.
11. **Анхимюк, В. Л.** Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Опейко, Н. Н. Михеев. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с. : ил.
12. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы : пер. с польск. / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с. : ил.
13. **Леоненков, А. В.** Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с. : ил.
14. **Усков, А. А.** Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика / А. А. Усков, А. В. Кузьмин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 143 с. : ил.
15. **Асаи, К.** Прикладные нечеткие системы : пер. с яп. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи ; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. – М. : Мир, 1993. – 368 с. : ил.
16. Структуры систем управления автоматизированным электроприводом / О. П. Ильин [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1978. – 368 с. : ил.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 01.12.2007

A. S. Koval, A. V. Shvayakov
To the issue of a fuzzy speed regulator
creation for an elevator direct torque
control electric drive with pulse-width-modulation
Belarusian-Russian University

Questions of fuzzy speed loop regulator of lifting gear reducing electric drive are considered in the paper. Mathematical description of electric and mechanical subsystems and non-linearity of worm reduction gear are given. Membership functions, logic rule base and logic conclusion algorithm of fuzzy regulator are given. Transition processes calculation for classical control system and control with fuzzy regulator system has been conducted.