

**К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПРЯМОМ УПРАВЛЕНИИ МОМЕНТОМ  
С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ  
В ЛИФТОВЫХ УСТАНОВКАХ**

**Канд. техн. наук, доц. КОВАЛЬ А. С., асп. ШВАЯКОВ А. В.**

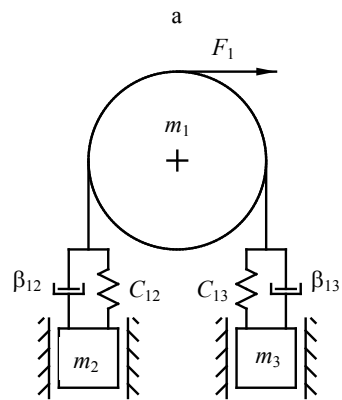
*Белорусско-Российский университет*

В настоящее время в редукторных лифтовых установках со скоростью движения до 2 м/с применяются системы управления электроприводом переменного тока с векторным управлением [1, 2]. Разновидностью таких систем являются приводы с прямым управлением моментом, которые обладают быстрым динамическим откликом по моменту [9–12, 14, 15, 18], что делает их перспективными для применения в лифтовых установках.

Сами лифтовые установки представляют собой сложные электромеханические системы, динамика которых определяется процессами в электрических и механических парциальных подсистемах. Эти подсистемы образуют собственно электропривод и элементы механической связи двигателя с кабиной лифта. Степень взаимодействия этих подсистем зависит от мно-

гих факторов, в частности от собственных частот, амплитуды колебаний и т. д. [5].

На рис. 1а приведена типовая функциональная схема редукторной лифтовой установки с высотой подъема до 150 м и скоростью движения кабины лифта до 2 м/с [1, 3, 4].



б

$$\begin{cases} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M - M_{12} + M_{13}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{12} - M_2 - M_{C2}; \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_3 - M_{13} - M_{C3}; \\ \frac{dM_{12}}{dt} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{dM_{13}}{dt} = C_{13}(\omega_3 - \omega_1), \end{cases} \quad (1)$$

где  $J_1, J_2, J_3$  – приведенные к общему валу моменты инерции двигателя, лифта, противовеса соответственно, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – то же угловые скорости вращения двигателя, лифта, противовеса соответственно, рад/с;  $M$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;  $M_{12}, M_{13}$  – то же моменты взаимодействия, Н·м;  $M_2, M_3$  – то же моменты, обусловленные силой тяжести, Н·м;  $M_{C2}, M_{C3}$  – то же моменты сопротивления, Н·м;  $C_{12}, C_{13}$  – коэффициенты жесткости при кручении связей, Н·м/рад.

Значения коэффициентов жесткости при растяжении можем определить [16] по формуле

$$C_{ij} = \frac{nSE}{L_{ij}}, \quad (2)$$

где  $C_{ij}$  – коэффициенты жесткости при растяжении соответствующей ветви, Н/м;  $n$  – число канатов в ветви;  $S$  – поперечное сечение каната, см<sup>2</sup>;  $E$  – модуль упругости стального каната, равный  $1,25 \cdot 10^6$  кг·с/см<sup>2</sup>;  $L_{ij}$  – длина соответствующей ветви каната, м.

Приведенные к общему валу моменты инерции определяются [0] следующим образом:

$$J_i = \frac{m_i R^2}{i^2}, \quad (3)$$

где  $m_i$  – масса тела, кг;  $R$  – радиус канатоведущего шкива, м;  $i$  – передаточное число редуктора.

Систему управления при прямом управлении моментом с широтно-импульсной модуляцией (ПУМ–ШИМ) можно описать системой уравнений в соответствии с [10, 11]:

$$\begin{cases} u_{SX} = R_S i_{SX} + \frac{d\Psi_S}{dt}; \\ u_{SY} = k_S M + \Omega_S \Psi_S, \end{cases} \quad (4)$$

где  $u_{SX}, u_{SY}$  – проекции вектора напряжения на оси  $X$  и  $Y$  соответственно, В;  $R_S$  – активное сопротивление фазы статора, Ом;  $i_{SX}$  – проекция вектора силы тока статора на ось  $X$ , А;  $\Psi_S$  – амплитуда потока статора, Вб;  $\Omega_S$  – угловая скорость вращения потока статора, рад/с;  $k_S$  – коэффициент пропор-

циональности между проекцией силы тока на ось  $Y$  и моментом асинхронного двигателя, значение которого определяется следующим образом:

$$k_s = \frac{2}{3} \frac{R_s}{p\Psi_s}, \quad (5)$$

где  $p$  – число пар полюсов.

Находим значение электромагнитного момента в системе векторного управления при ПУМ с ШИМ [15]:

$$M = \frac{3}{2} p\Psi_s i_{SY}, \quad (6)$$

где  $i_{SY}$  – проекция вектора силы тока статора на ось  $Y$ , А.

Электромагнитный момент (6) не зависит от скорости вращения АД при выполнении условий [15]:

$$\Psi_s \leq \frac{u_{SY} - R_s i_{SY}}{\Omega_s}; \quad (7)$$

$$i_{SX}^2 + i_{SY}^2 \leq I_{\max}^2, \quad (8)$$

где  $I_{\max}$  – максимальная сила тока, А;

$$u_{SX}^2 + u_{SY}^2 \leq u_{\max}^2, \quad (9)$$

где  $u_{\max}$  – максимальное напряжение, В.

Функциональная схема системы векторного управления при ПУМ–ШИМ пропорционально-интегральными регуляторами момента и скорости вращения при постоянном потоке статора показана на рис. 3.

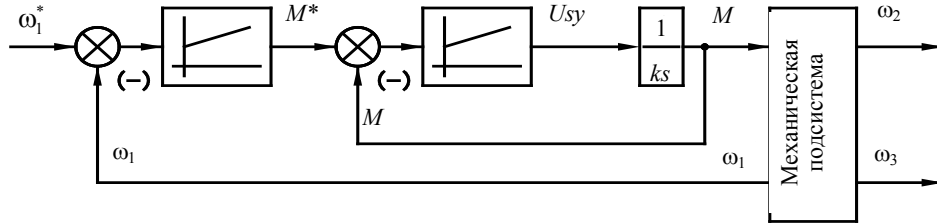


Рис. 3. Функциональная схема системы ПУМ–ШИМ с механической подсистемой

В соответствии с функциональной схемой (рис. 3) система уравнений для контуров управления моментом и скоростью примет вид:

$$\begin{cases} M^* = (\omega_1^* - \omega_1)(K_{pw} + K_{iw}/p); \\ M = (M^* - M)(K_{pm} + K_{im}/p), \end{cases} \quad (10)$$

где  $M^*$  – сигнал задания момента, поступающего с регулятора скорости, Н·м;  $\omega_1^*$  – то же скорости для двигателя, рад/с;  $K_{pw}$ ,  $K_{iw}$  – пропорциональный и интегральный коэффициенты усиления регулятора скорости соот-

ответственно;  $K_{pm}$ ,  $K_{im}$  – то же момента, учитывающие коэффициент  $k_s$  соответственно.

С помощью выражений (1), (4) и (10) могут быть получены различные передаточные функции рассматриваемой системы, а также оценено взаимодействие механической и электрической парциальных подсистем с целью демпфирования колебаний, обусловленных упругими связями.

Определим, например, передаточную функцию рассматриваемой системы по управляющему воздействию

$$W_M(p) = \frac{M(p)}{M^*(p)} = \frac{\frac{K_{pm}}{K_{im}} p + 1}{\left(\frac{1}{K_{im}} + \frac{K_{pm}}{K_{im}}\right) p + 1}. \quad (11)$$

Так как значение интегрального коэффициента  $K_{im}$ , как правило, велико [14, 15], (11) можно упростить

$$W_M(p) = \frac{M(p)}{M^*(p)} = \frac{\frac{K_{pm}}{K_{im}} p + 1}{\left(\frac{1}{K_{im}} + \frac{K_{pm}}{K_{im}}\right) p + 1} \approx \frac{\frac{K_{pm}}{K_{im}} p + 1}{\frac{K_{pm}}{K_{im}} p + 1} = 1. \quad (12)$$

Возможность такого упрощения подтверждается результатами расчета логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) и логарифмических фазочастотных характеристик (ЛФЧХ) при различных коэффициентах регулятора момента (рис. 4).

Передаточная функция по возмущающему воздействию, действующему на кабину лифтовой установки, может быть записана в виде

$$W_{M_{C2}}(p) = \frac{M(p)}{M_{C2}(p)} = \frac{(J_3 p^2 + C_{13})(K_{pw} p + K_{iw}) C_{12}}{D_1(p)}. \quad (13)$$

Здесь

$$D_1(p) = J_{\Pi} p^6 + J_2 J_3 K_{pw} p^5 + (J_{\Sigma 12} J_3 C_{12} + J_{\Sigma 13} J_2 C_{13} + J_2 J_3 K_{iw}) p^4 + \\ + K_{pw} (C_{12} J_3 + C_{13} J_2) p^3 + ((J_{\Sigma} C_{13} + K_{iw} J_3) C_{12} + J_2 K_{iw} C_{13}) p^2 + \\ + C_{12} C_{13} (K_{pw} p + K_{iw}),$$

где  $J_{\Pi} = J_1 J_2 J_3$ ;  $J_{\Sigma} = J_1 + J_2 + J_3$ ;  $J_{\Sigma 13} = J_1 + J_3$ ;  $J_{\Sigma 12} = J_1 + J_2$ .

Если моменты инерции  $J_2, J_3$  малы по сравнению с  $J_1$ , что имеет место в редукторном электроприводе, то в этом случае (13) преобразуется следующим образом:

$$W_{M_{C2}}(p) = \frac{M(p)}{M_{C2}(p)} = \frac{\frac{K_{pw}}{K_{iw}} p + 1}{\frac{J_1}{K_{iw}} p^2 + \frac{K_{pw}}{K_{iw}} p + 1}. \quad (14)$$

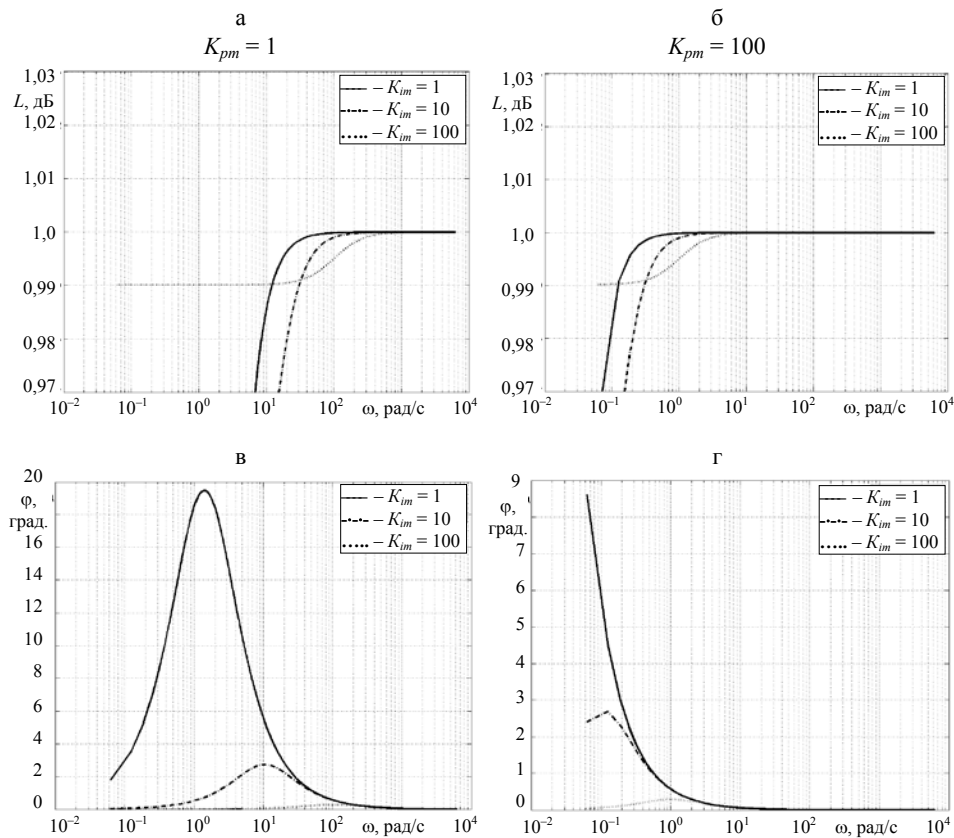


Рис. 4. Логарифмические частотные характеристики функции (12) при изменении  $K_{pm}$  и  $K_{im}$ : а, б – ЛАЧХ; в, г – ЛФЧХ

На рис. 5 показаны ЛАЧХ и ЛФЧХ, построенные по (13) и (14).

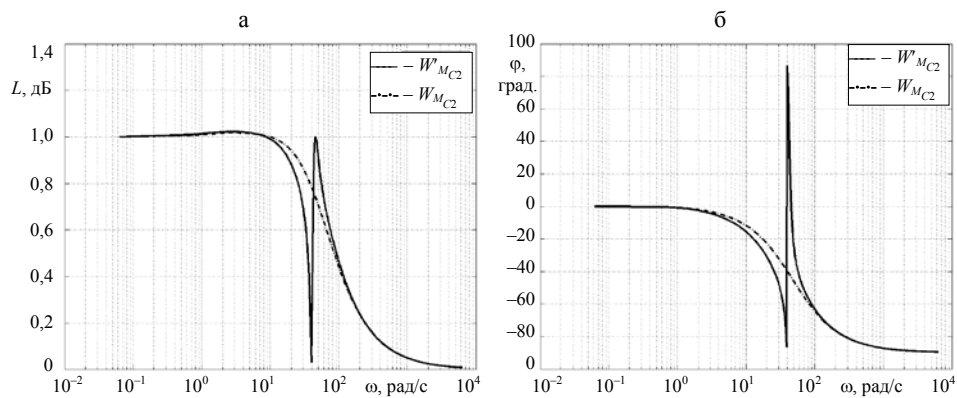


Рис. 5. Логарифмические частотные характеристики передаточных функций (13) и (14): а – ЛАЧХ; б – ЛФЧХ

Рассмотрим влияние коэффициентов регулятора скорости на частотные характеристики передаточных функций (14) (рис. 6).

Из (14) видно, что при большом  $K_{iv}$  уравнение примет следующий вид:

$$W_{M_{C2}}(p) = \frac{M(p)}{M_{C2}(p)} = \frac{\frac{K_{pw}}{K_{iw}} p + 1}{\frac{J_1}{K_{iw}} p^2 + \frac{K_{pw}}{K_{iw}} p + 1} \approx \frac{\frac{K_{pw}}{K_{iw}} p + 1}{\frac{K_{pw}}{K_{iw}} p + 1} = 1. \quad (15)$$

При  $K_{iw} \approx 0$  из (14) получим

$$W_{M_{C2}}(p) = \frac{M(p)}{M_{C2}(p)} = \frac{1}{\frac{J_1}{K_{pw}} p + 1}. \quad (16)$$

Логарифмические частотные характеристики, построенные по (14), показаны на рис. 6.

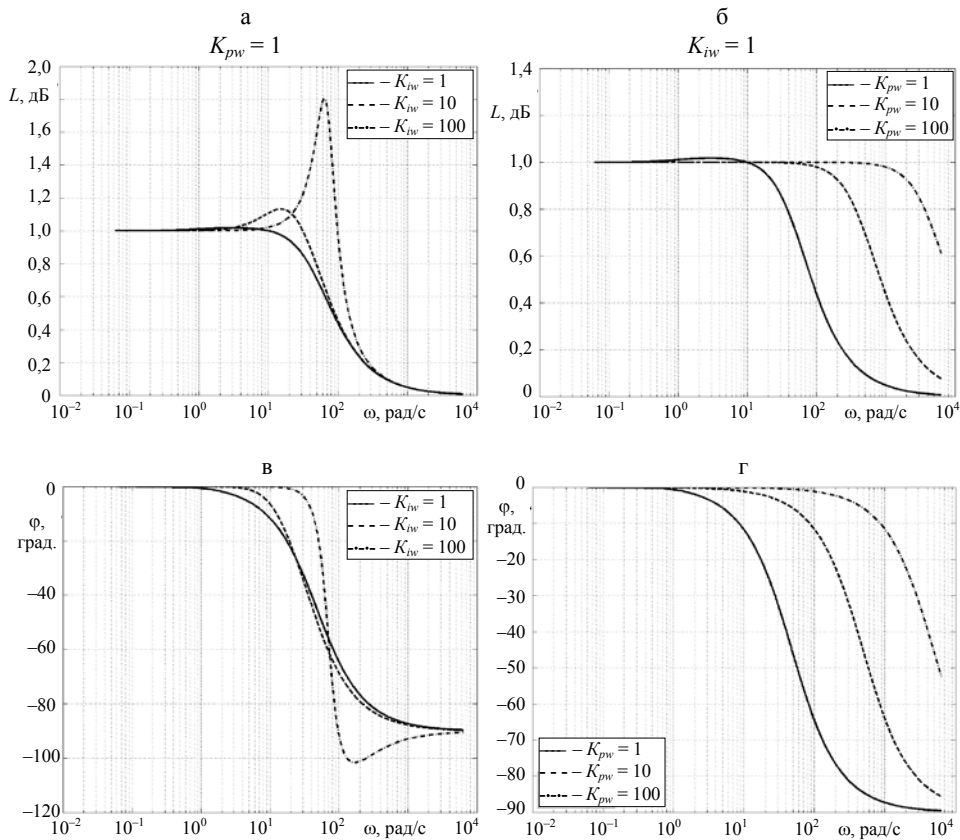


Рис. 6. Логарифмические частотные характеристики функции (14) при изменении  $K_{pw}$  и  $K_{iw}$ : а, б – ЛАЧХ; в, г – ЛФЧХ

Таким образом, по схемам, представленным на рис. 2 и 3, могут быть получены передаточные функции, на основе которых возможно выполнить анализ и синтез систем управления электроприводом при ПУМ–ШИМ для редукторных лифтовых установок.

Рассмотрим, например, возможности демпфирования колебаний механической парциальной подсистемы электрической. Выполним анализ демпфирующих свойств в соответствии с методикой, предложенной в [13]. Для этого из (1), (4) и (10) определим следующую передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{\varepsilon_2(p)}{M(p)} = \frac{\Omega_2^2 \Omega_3^2 (T_3^2 p^2 + 1)}{J_1 J_2 \Omega_{12}^2 \Omega_{13}^2 \left( (T_{12}^2 p^2 + 1)(T_{13}^2 p^2 + 1) - \frac{J_2}{J_{\Sigma 12}} \frac{J_3}{J_{\Sigma 13}} \right)}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_2(p)$  – угловое ускорение кабины лифта, рад/с<sup>2</sup>;  $\Omega_2, \Omega_3$  – частоты собственных колебаний, определяемые по (21) и (22), рад/с;  $\Omega_{12}, \Omega_{13}$  – то же по (19) и (20), рад/с;  $T_{12}, T_{13}$  и  $T_3$  – постоянные времени, с.

Передаточную функцию (17) при малых величинах моментов инерции  $J_2, J_3$  по сравнению с  $J_1$  можно упростить следующим образом:

$$W(p) = \frac{\varepsilon_2(p)}{M(p)} = \frac{\Omega_2^2 \Omega_3^2 (T_3^2 p^2 + 1)}{J_1 J_2 \Omega_{12}^2 \Omega_{13}^2 (T_{12}^2 p^2 + 1)(T_{13}^2 p^2 + 1)}. \quad (18)$$

Полюсы  $T_{12}$  и  $T_{13}$  и нуль  $T_3$  передаточной функции (18), определяют приближенные частоты резонансных пиков  $\Omega_{12} = 1/T_{12}$  и  $\Omega_{13} = 1/T_{13}$ . ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточной функции (18) показаны на рис. 7.

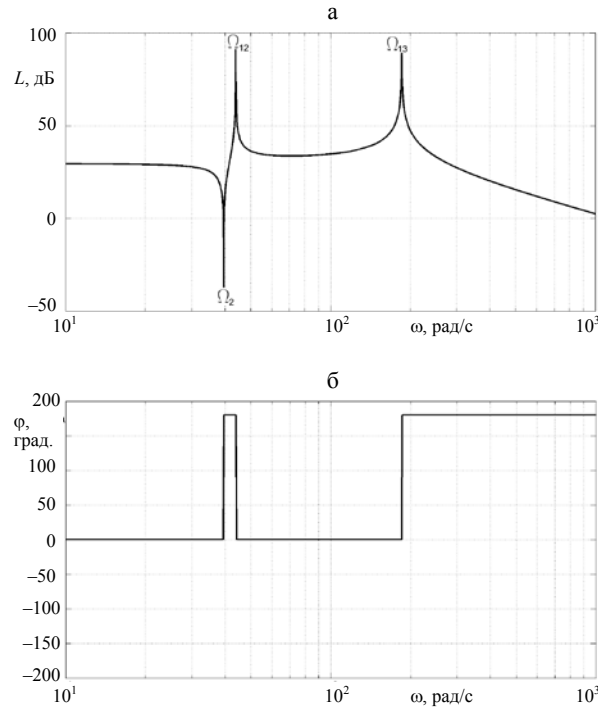


Рис. 7. Логарифмические частотные характеристики: а – ЛАЧХ; б – ЛФЧХ

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_{12}}}, \quad (19)$$

где  $J_{12} = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$  – эквивалентный момент инерции, кг·м<sup>2</sup>;

$$\Omega_{13} = \sqrt{\frac{C_{13}}{J_{13}}}, \quad (20)$$



где  $J_{13} = \frac{J_1 J_3}{J_1 + J_3}$  – эквивалентный момент инерции, кг·м<sup>2</sup>;

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_2}}; \quad (21)$$

$$\Omega_3 = \sqrt{\frac{C_{13}}{J_3}}. \quad (22)$$

Логарифмические частотные характеристики, построенные по передаточной функции (18) и представленные на рис. 7, показывают, что электрическая подсистема не оказывает демпфирующих действий на механическую подсистему, т. е. в редукторной электромеханической системе лифта с регулируемым электроприводом при ПУМ–ШИМ влияние упругих связей на тахограмму движения кабины, например при пуске, можно ограничить, как это и показано в [16], только за счет формирования момента двигателя по оптимальному закону, предварительно вывешивая кабину.

Параметры технологической установки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры технологической установки, принятые при расчетах

Параметры лифтовой установки и двигателя	Значение
Момент инерции двигателя, кг·м <sup>2</sup>	0,0206
Масса противовеса и кабины, кг	180, 150
Передаточное число редуктора	48
Диаметр канатоведущего шкива, м	0,575

## ВЫВОДЫ

1. Получены передаточные функции и рассчитаны логарифмические частотные характеристики, позволяющие определить влияние параметров регуляторов системы управления на частотные свойства контуров управления.

2. Выполнена оценка возможности демпфирования колебаний механической парциальной подсистемы электрической. Как показывают расчеты, выполненные в соответствии с методикой [13], электрическая подсистема не оказывает демпфирующих действий на колебания, возникшие в механической подсистеме в системе управления, построенной в соответствии с функциональной схемой, показанной на рис. 3.

## ЛИТЕРАТУРА

- Афонин, В. И. Регулируемый электропривод лифтов с асинхронными электродвигателями / В. И. Афонин, И. Н. Балабанов // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 37–42.
- Макаров, Л. Н. Современный электропривод скоростных лифтов повышенной комфортности / Л. Н. Макаров // Электротехника. – 2006. – № 5. – С. 42–46.

3. Ч у т ч и к о в, П. И. Электрооборудование лифтов массового применения / П. И. Чутчиков, Н. И. Алексеев, А. К. Прокофьев. – М.: Машиностроение, 1983. – 168 с.
4. Л и ф т ы: учеб. для вузов / под общ. ред. Д. П. Волкова – М.: Изд-во АСВ, 1999. – 480 с.
5. Р а с с у д о в, Л. Н. Электропривод с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мязель. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
6. H a t c h, M. R. Vibration simulation using MATLAB and ANSYS / M. R. Hatch. – New York: Chapman & Hall, 2001. – 660 p.
7. Р а о, Y. C. Engineering Analysis / Y. C. Pao. – Boca Raton, New York, Washington, D.C.: CRC Press LLC, 2001. – 354 p.
8. Т е р е х о в, В. М. Учет упругости длинных канатов в динамике электропривода подъемников / В. М. Терехов // Электричество. – 1969. – № 3. – С. 60–65.
9. K a z m i e r k o w s k i, M. P. Direct Torque Control of PWM Inverter-Fed AC Motors – A Review // III Summer Seminar on Nordick Network for Multi Disciplinary Optimized Electric Drives: Material of Proceeding. – Zegrze, Poland, 2003. – P. 1–19
10. Ш в а я к о в, 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.
11. К о в а л ь, А. С. К вопросу математического моделирования системы векторного управления при прямом управлении моментом на основе широтно-импульсной модуляции / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 2. – С. 90–97.
12. К о з я р у к, А. Е. Математическая модель системы прямого управления моментом асинхронного электропривода / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков // Электротехника. – 2005. – № 9. – С. 8–14.
13. К л ю ч е в, В. И. Ограничение динамических нагрузок электропривода / В. И. Ключев. – М.: Энергия, 1971. – 320 с.
14. K a z m i e r k o w s k i, M. P. DTC-SVM an Efficient Method for Control Both Induction and PM Synchronous Motor / M. P. Kazmierkowski, M. Zelechowski, D. Swierczynski. [Electronic resource]. – Riga, Latvia: In Proc. of the EPE-PEMC, 2004. – 1 CD-ROM.
15. V a s, P. Sensorless vector and direct torque control: monographs / P. Vas. – Oxford: Oxford university press, 1998. – 730 p.
16. Ч у п р а с о в, В. В. Исследование динамики электроприводов лифтов: дис. ... канд. техн. наук / В. В. Чупрасов. – М., 1976.
17. Ф и р а г о, Б. И. Теория электропривода / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2004. – 527 с.
18. Ф и р а г о, Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Минск: Техноперспектива, 2006. – 363 с.

Представлена кафедрой  
электропривода и АПУ

Поступила 21.04.2007