

УДК 62-83

С. П. Савич

### ЗНИЖЕННЯ КОЛИВАЛЬНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МЕХАНІЗМІВ ПІДЙОМУ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Анотація.** Розглядається електромеханічна система з електроприводом ПЧ-АД, в якій зменшуються коливання завдяки використанню оптимальної жорсткості механічної характеристики. Остання може бути отримана в замкнутому за швидкістю асинхронному електроприводі з частотним керуванням. Запропоновано структурну схему, отримано необхідні вирази для розрахунку параметрів цієї схеми.

**Ключові слова:** електромеханічна система, асинхронний електропривод, механічна характеристика, оптимальна жорсткість.

S. P. Savich

### DECLINE OF VIBRATING ELECTRICAL AND MECHANICAL SYSTEMS MECHANISM OF RECOVERY FROM AN ASYNCHRONOUS DRIVE

**Abstract.** An electromechanical system with electric IF-AD, in which the fluctuations are reduced by using optimal hardness mechanical properties. The latter can be obtained in closed-in speed asynchronous electric drive with frequency control. The proposed block diagram and obtained the necessary expressions to calculate the parameters of this scheme.

**Keywords:** dvomasova EMC, asynchronous electric, mechanical characteristics, optimal stiffness.

С. П. Савич

### СНИЖЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЗМОВ ПОДЪЕМА С АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

**Аннотация.** Рассматривается электромеханическая система с электроприводом ПЧ-АД, в которой уменьшаются колебания благодаря использованию оптимальной жесткости механической характеристики. Последняя может быть получена в замкнутом по скорости асинхронном электроприводе с частотным управлением. Предложена структурная схема, получены необходимые выражения для расчета параметров этой схемы.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, асинхронный электропривод, механическая характеристика, оптимальная жесткость.

Відомо, що кранові механізми підйому являють собою типову двомасову механічну частину (ДМЧ), представлену на рис.1 [1,4], де  $J_1, J_2$  – моменти інерції ротора двигуна і вантажу,  $C_{12}, b_{12}$  – еквівалентні коефіцієнти жорсткості і в'язкого тертя лінви відповідно;  $M$  – момент двигуна,  $M_c$  – статичний момент навантаження від вантажу. Узагальненими координатами є кути повороту мас  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$ . Похідні  $\dot{\varphi}_1$  та  $\dot{\varphi}_2$  є відповідно кутковими швидкостями  $\omega_1$  і  $\omega_2$ . Разом з електричною частиною (частотний перетворювач, асинхронний двигун, відповідні зворотні зв'язки) ця механічна частина є електромеханічною системою (ЕМС).

Задача даної роботи зводиться до аналізу коливань в ЕМС, коли електропривод працює на механічних характеристиках з різною жорсткістю  $\beta$  (зокрема на природній характеристиці) для різних співвідношень моментів інерції механізму і двигуна ( $J_2 / J_1$ ).

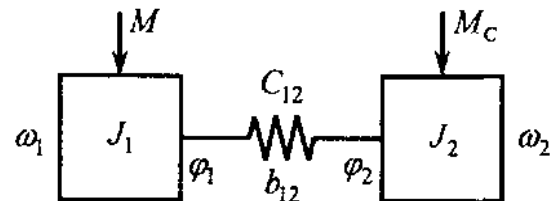


Рис. 1. Розрахункова схема механізму підйому

Відомо, що коли  $\beta = 0$  або  $\beta = \infty$ , електропривід не демпфує коливань ЕМС, тобто коливання в цьому разі без врахування в'язкого тертя ( $b_{12} = 0$ ) не затухають [3]. Проте в ЕМС, у якій жорсткість механічної характеристики кінцева, тобто якщо  $0 < |\beta| < \infty$ , коефіцієнт при  $r$  характеристичного рівняння не дорівнює нулю. Це означає, що здійснюється демпфування коливань ЕМС електроприводом, який працює на характеристиці з кінцевою негативною жорсткістю. Очевидно тому існує така оптимальна жорсткість механічної характеристики  $\beta$ , при якій демпфування коливань найбі-

льше, тобто коли коефіцієнт демпфування  $\zeta$  коливальної ланки приймає максимальне значення  $\zeta_{max}$ . Це оптимальне значення  $\beta$  визначено в [2]. Типове характеристичне рівняння ЕМС для схеми на рис. 1, коли  $b_{12} = 0$ ,

$$T_M T^2 p^3 + T_2^2 p^2 + T_M p + 1 = 0, \quad (1)$$

далі представлене в стандартному вигляді добутком відповідних характеристичних поліномів інерційної ланки і ланки другого порядку (коливальної)

$$\left( \frac{k}{\Omega_0} p + 1 \right) \left( \frac{1}{\Omega_0^2} p^2 + \frac{2 \cdot \zeta}{\Omega_0^2} p + 1 \right) = 0, \quad (2)$$

де  $T_M$  – електромеханічна стала часу електропривода, коли  $C_{12} = \infty$ ,  $T$  і  $T_2$  – сталі часу, однозначно пов'язані з частотою коливань ДМЧ  $\Omega$  і  $\Omega_2$ ;  $\Omega_0$  і  $\zeta$  – частота і коефіцієнт демпфування коливальної ланки,  $\hat{e} = \frac{\Omega_0}{\Omega_1}$  відношення сталих часу інерційної  $\left( \dot{\Omega}_1 = \frac{1}{\Omega_1} \right)$  і коливальної  $\left( \dot{\Omega}_0 = \frac{1}{\Omega_0} \right)$  складових.

Якщо прирівняти відповідні коефіцієнти при  $p^3$ ,  $p^2$  і  $p$  в лівих частинах (1) і (2), отримуємо три рівняння. Спільне їх рішення дозволяє зв'язати реальні параметри ЕМС  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $\beta$ ,  $C_{12}$  з такими фіктивними величинами, як  $\Omega_0$  і  $\zeta$ , які характеризують показники якості електромеханічної системи. Таким чином, отримана формула для максимального значення коефіцієнта демпфування

$$\zeta_{max} = 0,5 (\sqrt{\gamma} - 1), \quad (3)$$

де коефіцієнт співвідношення мас

$$\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}.$$

З (3) випливає, що максимальне демпфування коливань залежить лише від співвідношення моментів інерції, і якщо  $\gamma \geq 9$ , то  $\zeta_{max} \geq 1$ , а ЕМС перестає бути коливальною.

Забезпечити  $\zeta_{max}$ , тобто найкраще демпфування коливань, можна, реалізувавши оптимальну жорсткість механічної характеристики електропривода; її значення можна розрахувати за виразом, який одержано в [2]

$$\beta_{opt} = J_1 \cdot \Omega_2 \sqrt[4]{\left( \frac{J_1 + J_2}{J_1} \right)^3}, \quad (4)$$

де  $\Omega_2 = \sqrt{\frac{C_{12}}{J_2}}$  – частота коливань одномасової механічної частини.

Для аналізу коливань моделюємо ЕМС в такому режимі: електропривод, який працює на природній характеристиці при неробочому ході, навантажуюмо номінальним моментом ( $M_c = M_n = const$ ) і задаючись різними значеннями моменту інерції механізму ( $J_2 = var$ ) при постійному значенні моменту інерції двигуна, знімаємо осцилограми моменту пружної ланки  $M_{12}(t)$  та швидкостей обох мас; їх далі порівнюємо з аналогічними залежностями, знятими при тих же параметрах ЕМС, але якщо електропривод працює на характеристиці з оптимальною жорсткістю. Для моделювання системи обираємо двигун краново-мета-лургійної серії, тип 4МТКН 160 L6/16.

Механізми підйому характеризуються відношеннями приведених моментів інерції  $J_2/J_1 \leq 0.2$ , а механізми горизонтального переміщення кранів – навпаки,  $J_2/J_1 \geq 6,0$ . Задаємось значенням коефіцієнта жорсткості  $C_{12} = 423$  Н·м і проводимо розрахунок для такого конкретного співвідношення моментів інерції  $J_2/J_1 \in [6; 2; 0,5; 0,2]$ , які включають обидва типи механізмів.

За формулою (4) розраховані  $\beta_{opt}$  механічних характеристик та їх номінальні швидкості для різних співвідношень моментів інерції. Ці дані внесені до табл.1, а на рис. 2 зображено відповідні механічні характеристики. Для природної характеристики цього двигуна  $\beta_{пр} = 4,335$  (Нмс),  $\omega_n = 96,34$  рад/с.

Розрахунки підтверджують висновок [2] про те, що найменша оптимальна жорсткість має бути при  $\gamma = 3$ . Вони також свідчать, що жорсткість усіх оптимальних характеристик більша природної, тому і швидкості двигуна при номінальному навантаженні теж більші.

Розрахунок перехідних процесів виконується в пакеті “Simulink” програми Matlab, в якому моделюємо відповідну двомасову ме-

ханічну частину (рис. 3). Результати моделювання для моменту пружності  $M_{12}$  наведені на рис 4 і в табл. 2.

В таблиці наведені значення перерегулювання  $\sigma$  і декременту затухання  $\alpha$ . Останній на оптимальній характеристиці вдвічі більший, ніж на природній.

1. Оптимальна жорсткість механічних характеристик і відповідна номінальна швидкість

$\frac{J_2}{J_1}$	$\beta_{\text{ОПТ, Н}\cdot\text{мс}}$	$\omega'_n, \text{рад/с}$
6	14	102,12
2	12,84	101,9
0,5	15,27	102,34
0,2	20,42	102,94

2. Перерегулювання і логарифмічний декремент затухання

$J_2$		Перерегулювання і декремент затухання $M_{12}$			
$J_2/J_1$	кг·м <sup>2</sup>	$\sigma, \%$ , для характеристик		$\alpha$ , для характеристик	
		природної	оптимальної	природної	оптимальної
6	0,9	0	0	--	--
2	0,3	0	20,5	--	0,167
0,5	0,075	43,7	62,87	0,04	0,22
0,2	0,03	77,03	82,04	0,054	0,121

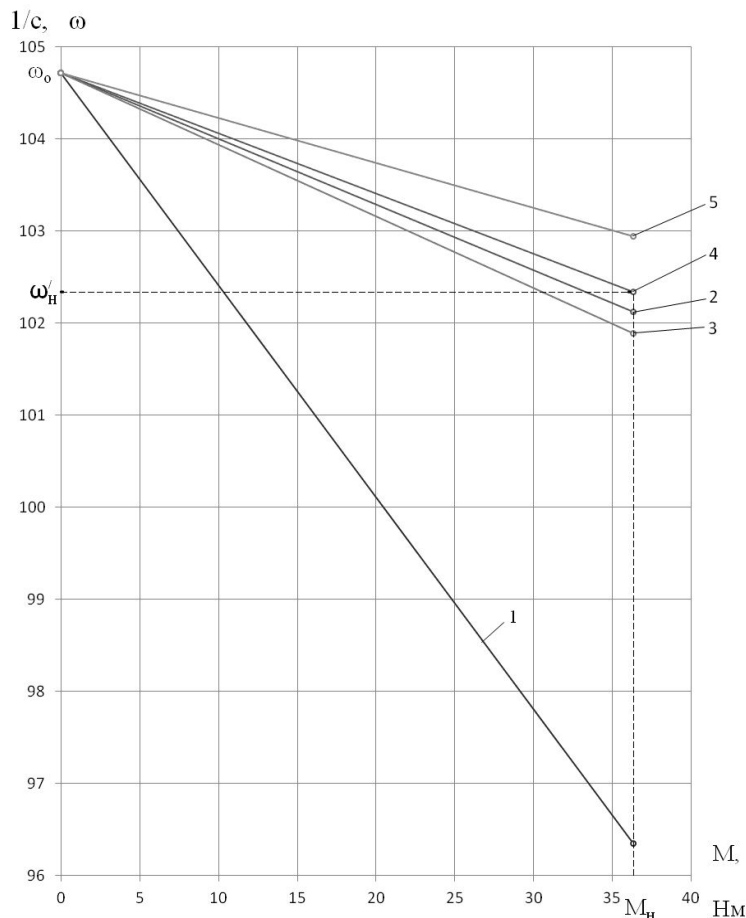


Рис. 2. Механічні характеристики: 1 – природна; 2, 3, 4, 5 – оптимальні при  $J_2/J_1 = 6$  (2),  $J_2/J_1 = 2$  (3),  $J_2/J_1 = 0,5$  (4) і  $J_2/J_1 = 0,2$  (5)

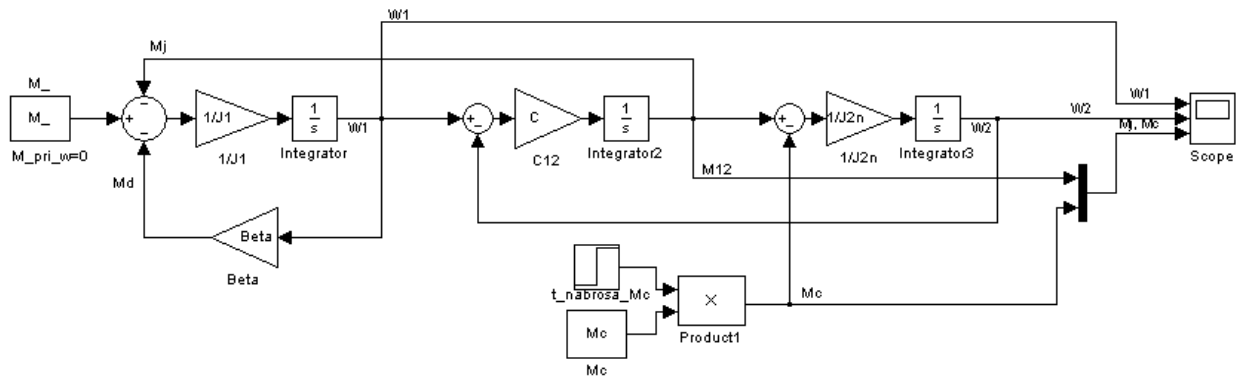


Рис. 3. Модель двомасової механічної частини

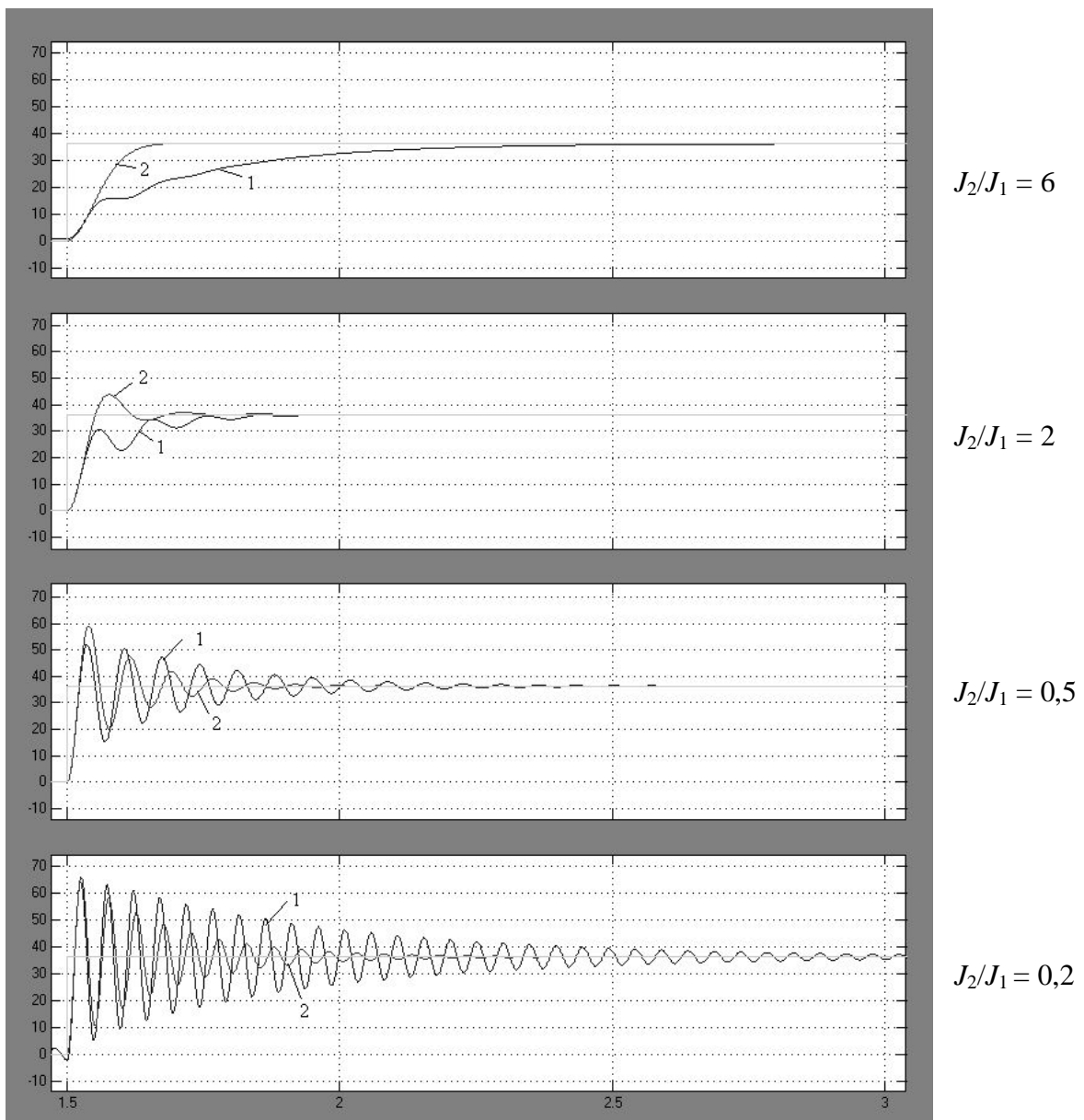


Рис. 4. Графіки перехідних процесів  $M_{12}$  при роботі на природній (1) і оптимальній (2) характеристиках

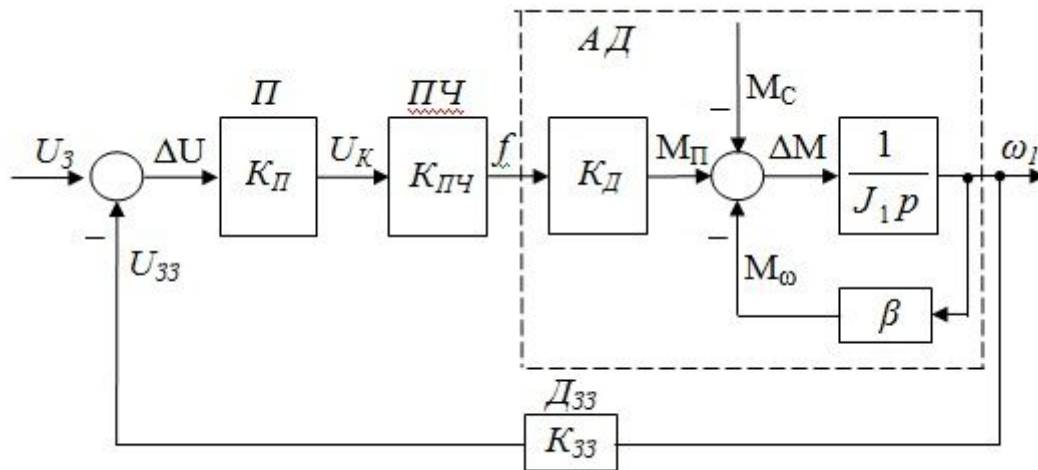


Рис. 5. Структурная схема ПЧ-АД

Як це видно з результатів моделювання, даних в табл.2, коливання ЕМС при роботі на оптимальній характеристиці значно менші, ніж на природній. Особливо це проявляється при невеликих значеннях  $J_2$ , тобто є сенс переходити до оптимальної характеристики для механізмів з невеликим значенням  $\gamma = (J_1 + J_2) / J_1$ , а саме це характерне для кранових механізмів підйому.

Використання асинхронного електропривода з перетворювачем частоти (ПЧ-АД) дає змогу отримати механічні характеристики з необхідною жорсткістю, більшою, ніж на природній характеристиці. Для реалізації таких характеристик запропоновано структурну схему електропривода ПЧ-АД, яку наведено на рис. 5. На ній: П – підсилювач з  $K_\Pi$  (на виході напруга керування  $U_K$ ), ПЧ – перетворювач частоти (на виході частота  $f$ ), Дзз – датчик зворотнього зв'язку за швидкістю з  $K_{зз}$ , Кд – коефіцієнт підсилення першої ланки асинхронного двигуна; якщо вважати механічну характеристику лінійною (а на робочій ділянці це так), то пусковий момент  $M_\Pi$  пропорційний частоті  $f$ . Перетворивши структурну схему рис. 5, отримаємо вираз для швидкості двигуна

$$\omega_1 = \frac{\frac{K_1}{K_1 K_{\zeta\zeta} + \beta}}{\frac{J_1}{K_1 K_{\zeta\zeta} + \beta} p + 1} U_\zeta - \frac{\frac{1}{K_1 K_{\zeta\zeta} + \beta}}{\frac{J_1}{K_1 K_{\zeta\zeta} + \beta} p + 1} \dot{I}_N, \quad (5)$$

а в режимі статики

$$\omega_1 = \frac{K_1}{K_1 K_{\zeta\zeta} + \beta} U_\zeta - \frac{1}{K_1 K_{\zeta\zeta} + \beta} \dot{I}_N, \quad (6)$$

де  $K_1 = K_n K_{nc} K_d$ ;  $\beta$  – жорсткість природної характеристики.

Задасмо двома граничними режимами на оптимальній механічній характеристиці (рис.2), яка нас цікавить, а саме: коли  $M_c = 0$ ,  $\omega = \omega_0$ , а коли  $M_c = M_n$ ,  $\omega = \omega'_n$ . Якщо підставити їх по чергово в (5) і (6), знайдемо дві невідомі величини, які мають забезпечити цю оптимальну характеристику: задану напругу  $U_\zeta$  і коефіцієнт підсилення підсилювача П:

$$\hat{E}_I = \frac{1}{\hat{E}_{I\kappa} \hat{E}_{\bar{A}} \hat{E}_{\zeta\zeta}} \left[ \frac{\dot{I}_I}{\omega_0 - \omega_I} - \beta \right], \quad (7)$$

$$U_\zeta = \frac{\hat{E}_I \hat{E}_{I\kappa} \hat{E}_{\bar{A}} \hat{E}_{\zeta\zeta} + \beta}{\hat{E}_{\bar{A}} \hat{E}_{I\kappa} \hat{E}_{\bar{A}1}} \cdot \omega_0. \quad (8)$$

Таким чином, використовуючи електропривід ПЧ-АД, який може видавати частоту дещо більшу за номінальну, згідно зі схемою рис. 5 і виразами (7) і (8) можна сформулювати необхідні оптимальні механічні характеристики з жорсткістю, більшою за природну, і завдяки цьому суттєво зменшити коливальність двомасової ЕМС механізму підйому.

Список використаної літератури

1. Борцов Ю.А. Тирсторные системы электропривода с упругими связями / Ю.А. Борцов, Г.Г. Соколовский. – М.: Энергия, 1979. – 160 с.

2. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, В.А. Лещёв.– СМИЛ, 2008. – 192 с.

3. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов / В.И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.

4. Комаров М.С. Динамика грузоподъемных машин / М.С. Комаров – М.: Машгиз, 1962. – 268 с.



Савич  
Світлана Павлівна,  
ст.викладач  
каф. енергоменедж-  
менту Одеськ. нац.  
політехн. ун-ту

Отримано 10.02.2012

References

1. Bortsov Yu.A., Sokolovsky G.G. Thyristor Electric Drive with elastic connections. – Moscow: Energiya, 1979. – 160 p. [in Russian].

2. Gerasymiak R.P., Leshchev V.A. Analysis and Synthesis of Crane electromechanical Systems. – Smiley, 2008. – 192 p. [in Russian].

3. Klyuchev V.I. Theory of Electric Drive. – Moscow: Energoatomizdat, 1985. – 560 p. [in Russian].

4. Komarov M.S. Dynamics of lifting equipment. – Moscow: Mashgiz, 1962. – 268 p. [in Russian].