

В.И.Большаков, В.В.Буцукин

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ БИЕНИЙ В КРУТИЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Целью работы является исследование процесса развития биений в двухмассовом электромеханическом приводе тяжелых металлургических машин за счет обмена энергией между электрической и механической системами. На основе математического моделирования показана возможность возникновения биений в подобных системах, если соотношение упруго-массовых и электрических параметров находится в пределах неблагоприятного диапазона. Показано, что при введении положительных обратных связей увеличивается частота, уменьшается рассеяние энергии колебаний, снижается устойчивость привода и, как правило, при колебаниях усиливается взаимодействие электрической и механической систем привода.

тяжелые металлургические машины электромеханический привод, биения, энергия колебаний, обратные связи, математическое моделирование

Анализ состояния проблемы. Гармонические колебания, амплитуда которых колеблется во времени с квазипериодом, большим по сравнению с квазипериодом «несущего» колебательного процесса достаточно широко распространены в приводах тяжелых металлургических машин [1]. Явление это, как правило, сопровождается увеличением нагрузок в элементах привода, может приводить к неадекватной реакции системы управления. Условия возникновения и меры борьбы с ним изучены до настоящего времени недостаточно [3], в связи с чем в [1], на основании анализа публикаций и собственных исследований динамики тяжелых металлургических машин, были предложены направления и задачи исследования биений в силовых цепях приводов машин. Одной из задач, сформулированных в [1] является оценка возможности развития биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами привода. Появление такой задачи связано с тем, что в новых серийных электродвигателях (ЭД) постоянного тока, по сравнению с выпускавшимися ранее, произошло существенное увеличение круговой частоты свободных колебаний электромеханической системы двигателя $\beta_{эд}$. Явление это, ставшее следствием уменьшения относительного момента инерции, повышения электромагнитной C_e и механической C_m постоянных, применение компенсационных обмоток в цепи ротора привело к необычному соотношению частот свободных колебаний электрической и механической систем некоторых приводов, созданных на основе подобных двигателей. Так, в приводе наклона сталеплавильного конвертера вместимостью 160 тонн, круговая частота электромеханической системы собственно электродвигателя, рассчитанная по известной методике [4], оказалась лежащей в диапазоне $\beta_{эд} = 19,6 - 32,8 \text{ с}^{-1}$ [2], при этом вместо распространенного в тяжелых машинах [5] соотношения $\beta_{эд} \ll \beta_{м1}$ (здесь и далее $\beta_{м1}$ обозначает низшую частоту свободных колебаний механической системы привода), в этом приводе их диапазоны перекрываются, причем $\beta_{эд} \geq \beta_{м1}$.

Постановка задачи. Поскольку в приводе вышеуказанного конвертера были экспериментально зафиксированы существенные биения моментов сил упругости в механической системе [6], то возник естественный вопрос: не связаны ли эти биения с таким необычным для тяжелых машин соотношением частот свободных колебаний электродвигателей и механической системы? Проведенное авторами исследование [2] на основе частотного анализа и математического моделирования переходных процессов, анализа соотношения между первой β_1 и второй β_2 частотами свободных колебаний приведенной двухмассовой электромеханической системы (ЭМС) привода наклона конвертера вместимостью 160 тонн показали, что в реально существующем диапазоне параметров этой системы развитие в ней биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами не происходит. Помимо решения прикладной задачи – выявления причин развития опасных биений в приводе наклона конвертера, в ходе исследования [2] получены зависимости, связывающие электрические и упруго–массовые параметры двухмассовой

ЭМС с относительной разностью частот этой системы $\epsilon_{\Delta\beta} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\beta_1}$, оп-

ределяющей ее склонность к биениям. Установлены два диапазона соотношения параметров двухмассовой ЭМС, при котором ее круговые частоты оказываются достаточно близки ($\epsilon_{\Delta\beta} < 0,33$, обоснование этого соотношения приведено в [1]) и система становится склонна к развитию в ней биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами [2]. Исследование возможности развития биений за счет такого обмена энергией в случае, если соотношение параметров ЭМС соответствует диапазонам, опасным с точки зрения развития биений, проведено не было.

Изложение основных материалов исследования. В статье даётся изложение результатов оценки возможности развития биений за счёт обмена энергией между электрической и механической системами привода, соотношение параметров ЭМС которого находятся в опасном, с точки зрения развития биений диапазоне [2].

В качестве базовой модели в исследовании использована двухмассовая электромеханическая система (рис.1), численные значения параметров и особенности частотного спектра которой были изучены ранее в [2] применительно к приводе наклона конвертера. Система представляет собой двухмассовую механическую систему (МС), к которой присоединена электрическая система эквивалентного ЭД, заменяющего четыре ЭД постоянного тока с независимым возбуждением, имеющиеся в реальном приводе наклона конвертера. Базовые значения параметров системы, приведенные к валу ЭД: момент инерции ротора эквивалентного ЭД $\Theta_1 = 175,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; момент инерции рабочего органа машины $\Theta_2 = 48,1 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; крутильная жесткость упругой связи $C_{12} = 15300 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; номинальная угловая скорость ротора ЭД $\omega_{\text{ном}} = 49,19 \text{ рад}^{-1}$; собственная частота двухмассовой МС $\beta_{m1} = 20,1 \text{ с}^{-1}$. Номинальный момент эквивалентного ЭД $M_{\text{ном}} = 10570,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, номинальная сила тока $I_{\text{ном}} = 1300 \text{ А}$, номинальные индуктивность и активное сопротивление эквивалентной

якорной цепи $L = 0,664$ мГн и $R = 0,0084$ Ом соответственно. Постоянные и частота эквивалентного ЭД: $C_e = 8,71$ В·с⁻¹; $C_m = 8,12$ Н·м/А; $\beta_{эд} = 24,6$ с⁻¹.

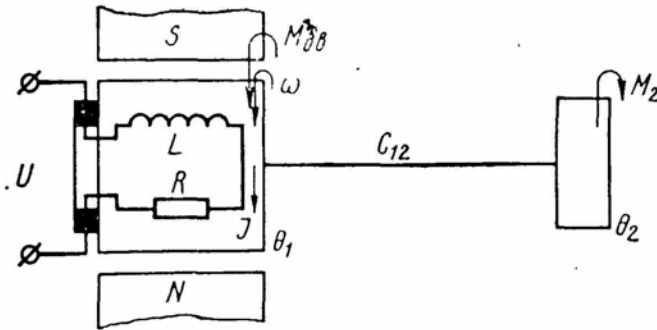


Рис. 1. Двухмассовая электромеханическая приведенная расчетная схема привода: U – напряжение источника питания; J – ток в цепи якоря эквивалентного ЭД; $M_{дв}$ – момент, развиваемый эквивалентным ЭД; ω – угловая скорость якоря ЭД; M_2 – момент от внешней нагрузки.

В исследовании принималось, что момент внешней нагрузки, постоянный по величине (25% $M_{ном}$), направлен противоположно направлению движения якоря двигателя, а зазор в связи и моменты трения на массах Θ_1 и Θ_2 отсутствуют. Поскольку ранее установлено, что в реально возможном диапазоне изменения параметров привода наклона конвертера развитие биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами привода не происходит, в исследовании рассмотрен вариант системы с изменёнными упруго – массовыми параметрами. В [2] для анализа частотных свойств ЭМС по рис. 1 введены безразмерные коэффициенты:

$$K_{\Theta} = \frac{\Theta_1}{\Theta_2}, K_c = \frac{C_{дв}}{C_{12}}, \quad (1)$$

где $C_{дв}$ – предложенная Л.И. Цехновичем [7] в рамках электромеханического аналога эквивалентная жесткость электрической системы.

Согласно [7]

$$C_{дв} = \frac{C_e \times C_m}{L}. \quad (2)$$

В нашем случае $C_{дв} = 106514$ Н·м/рад.

Анализ, проведенный в [2] показал, что благоприятное ($\epsilon_{дв} < 0,33$) для возникновения биений соотношение частот ЭМС с двумя степенями свободы возникает при: $K_{\Theta} > 50$ и $K_c > 40 \dots 70$, а также при $15 < K_{\Theta} < 50$ и $K_c \approx$

K_{Θ} .

Для дальнейшего исследования принят вариант системы с неизменными электрическими параметрами и механической системой, изменённой так, что $K_{\Theta} = 25$ и $K_c = 25$. В этом случае, сохраняя неизменным $\Theta_1 = 175,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, получаем $\Theta_2 = 7,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, при $C_{дв} = 106514,0 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$ из соотношения (1) находим $C_{12} = 4260,6 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$.

У видоизменённой таким образом системы [1, 4] собственные частоты ЭМС $\beta_1 = 22,28 \text{ с}^{-1}$, $\beta_2 = 27,21 \text{ с}^{-1}$, $\epsilon_{\Delta\beta} = 0,22$. В системе возможно развитие биений с периодом $T_6 = 1,28 \text{ с}$.

На первом этапе моделировалось поведение системы при пуске из неподвижного положения с незакуроченной упругой связью (момент сил упругости в связи M_{12} в начальный момент времени равен нулю) при существующей в реальном приводе номинальной величине активного сопротивления $R = 0,0084 \text{ Ом}$. Время пуска принималось равным $1,5 \text{ с}$ (в соответствии с принятым в приводе базовой ЭМС). Реакция системы исследовалась с помощью известной [4] системы дифференциальных уравнений, описывающих её поведение. Решение уравнений осуществлялось методом Рунге – Кутты. Для удобства сравнения различных вариантов изучаемой системы численные результаты и графики их изменения выводились на экран компьютера в относительных единицах. Графики тока I , момента сил упругости M_{12} , угловых скоростей первой ω_1 и второй ω_2 массы M_C выводятся в относительных единицах i , m , w_1 и w_2 соответственно:

$$i = I / I_{\text{ном}}, m = M_{12} / M_{\text{ном}}, w_1 = \omega_1 / \omega_{\text{ном}}, w_2 = \omega_2 / \omega_{\text{ном}}. \quad (3)$$

Очевидно, что величины относительного момента сил упругости и силы тока являются, фактически, коэффициентами динамичности, вычисленными на базе соответствующих номинальных параметров. Графики их изменения для случая привода с вышеуказанными параметрами приведены на рис.2, а численные параметры – в табл.1. В таблице указаны круговая частота β с которой колеблется соответствующий параметр, его наибольшее значение m_{ax} , краткая характеристика колебательного процесса.

Как видно из данных таблицы и рис.2, пуск системы, потенциально склонной к развитию биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами, при номинальных параметрах ЭД протекает достаточно плавно, колебания происходят на первой частоте ЭМС β_1 . Размах колебаний незначителен, затухание у всех параметров (кроме силы тока в якорной цепи) происходит, фактически, за время пуска системы ($1,5 \text{ с}$ – т.е. в течение 5–6 циклов колебаний).

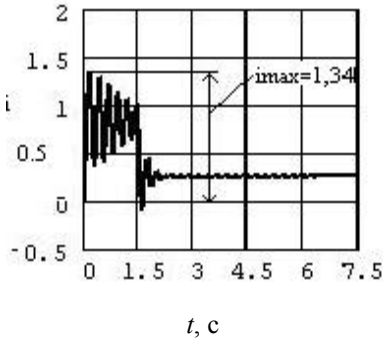
Таким образом, в исследованной системе при обычных значениях активного сопротивления биения не развиваются и поведение системы в переходных процессах мало отличается от поведения системы, не склонной к развитию биений. Полученные результаты подтверждают известное из практики исследования электромеханических систем [8,9] положение о благоприятном, с точки зрения успокоения колебаний, воздействии рассеяния энергии в активном сопротивлении якорной цепи на работу ЭМС приводов. В принципе, вопрос можно считать решённым, однако, в связи с настойчиво проводимыми

работами по созданию сверхпроводящих элементов в обозримом будущем возможно существенное уменьшение активного сопротивления якорных цепей ЭД [10].

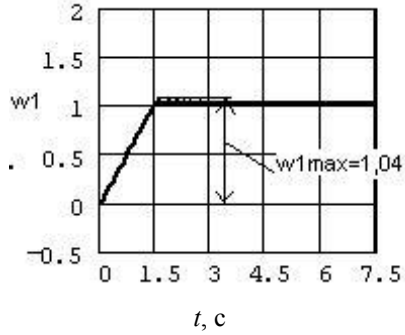
Таблица 1. Параметры системы по рис.1 при пуске из неподвижного положения

Величина активно-го сопротивления	Параметры, max – в относительных единицах			
	i	m	$w1$	$w2$
R	$\beta 1, max=1,34$ Биения отсутствуют, колебания затухающие	$\beta 1, max=0,53$ Биения отсутствуют, колебания затухающие	$\beta 1, max=1,04$ Биения отсутствуют, колебания затухающие	$\beta 1, max=1,07$ Биения отсутствуют, колебания затухающие
$0,50R$	$\beta 1, max=1,49$ Просматривается один период биений с $T_6 \approx 1,28$ с, колебания затухают на 7-ой секунде	$\beta 1, max=0,53$ Признаки проявления одного периода биений $T_6 \approx 1,28$ с, колебания затухают после 5-ой секунды	$\beta 1, max=1,05$ Биения отсутствуют, колебания затухающие	$\beta 1, max=1,13$ Биения отсутствуют, колебания затухающие
$0,10R$	$\beta 1, max=1,76$ Биения, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta 1, max=0,54$ Биения слабовыраженные $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta 1, max=1,08$ Биения отсутствуют, колебания слабозатухающие	$\beta 1, max=1,36$ Признаки проявления двух периодов биений $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие
$0,05R$	$\beta 1, max=1,82$ Биения, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta 1, max=0,55$ Биения слабовыраженные $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta 1, max=1,08$ Биения, $T_6 \approx \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta 1, max=1,42$ Биения, $T_6 \approx \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие
$0,01R$	$\beta 1, max=1,87$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с	$\beta 1, max=0,60$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с	$\beta 1, max=1,09$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с	$\beta 1, max=1,48$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с

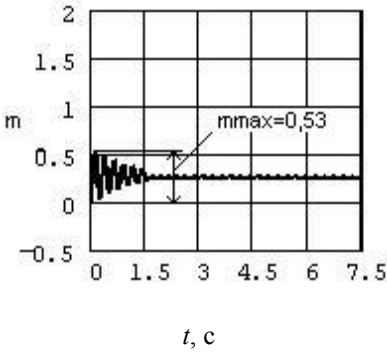
Следствием этого может стать возрастание склонности ЭМС привода к развитию колебаний. Для оценки влияния уменьшения активного сопротивления на динамические свойства ЭМС авторы приняли решение продолжить аналитическое исследование поведения двухмассовой ЭМС с двигателем постоянного тока – теперь уже при уменьшенных значениях активного сопротивления цепи якоря ЭД. Полагая все прочие параметры системы неизменными, моделировали поведение системы при уменьшенных значениях активного сопротивления – $0,5R$, $0,1R$, $0,05R$ и $0,01R$. Результаты расчетов приведены в табл.1. На рис.3 в качестве примера приведены графики для случая привода с уменьшенным в 100 раз активным сопротивлением якоря ($0,01R$).



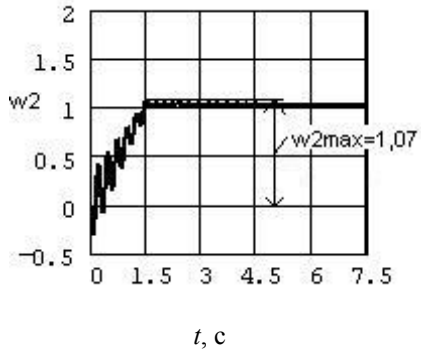
А)



В)



Б)



Г)

Рис.2. Графики изменения относительных величин сил тока i (А) эквивалентного электродвигателя, момента сил упругости в связи С12 m (Б), угловой скорости массы $\Theta 1$ $w1$ (В) и угловой скорости массы $\Theta 2$ $w2$ (Г) при номинальном активном сопротивлении якорной цепи

Из данных табл.1 и рис.2,3 видно, что уже при двукратном (случай 0,5R табл.1) снижении активного сопротивления в переходном процессе тока и момента сил упругости в связи С12 появляются признаки развития биений, при десятикратном уменьшении сопротивления (случай 0,1R) колебания всех приведенных в табл.1 параметров становятся слабозатухающими, при этом колебания силы тока носят четко выраженный характер биения, колебания момента сил упругости и угловой скорости рабочего органа происходят с относительно неглубокими биениями, масса, соответствующая моменту инерции ЭД колеблется с незначительными (менее 7%) отклонениями от среднего значения угловой скорости.

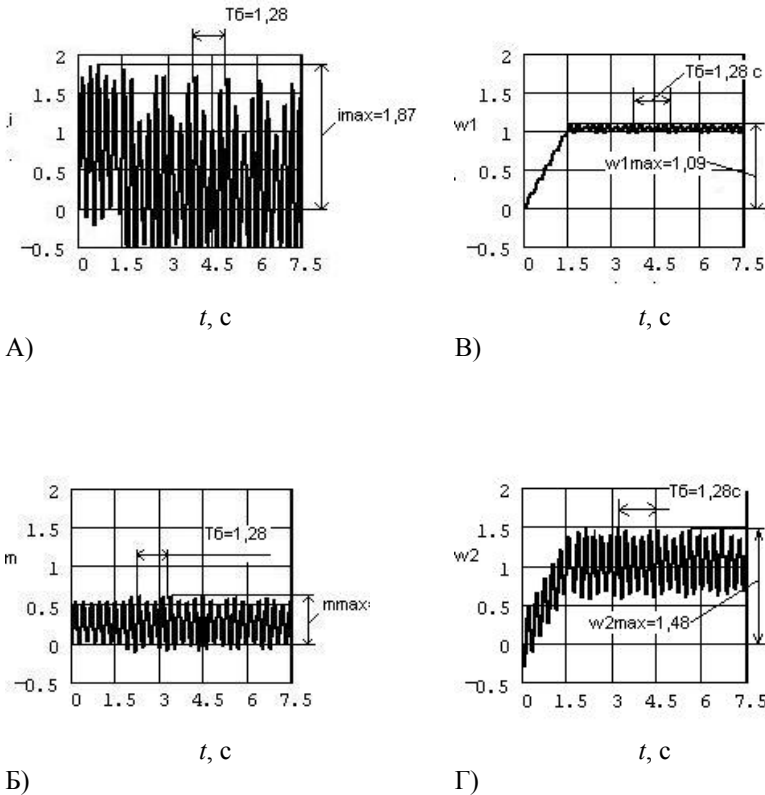


Рис.3. Графики изменения относительных величин силы тока i (А) эквивалентного электродвигателя, момента сил упругости в связи С12 m (Б), угловой скорости массы $\Theta 1$ w_1 (В) и угловой скорости массы $\Theta 2$ w_2 (Г) в случае уменьшенного в сто раз активного сопротивления якорной цепи

Дальнейшее уменьшение активного сопротивления приводит в рассматриваемой системе при сопротивлении, равном $0,05R$ к развитию биений всех рассматриваемых параметров, сопровождающимся возрастанием наибольшего отклонения колеблющихся величин от средних значений, при уменьшении сопротивления до $0,01R$ колебания параметров системы становятся практически незатухающими (рис.3). Период биений во всех наблюдавшихся случаях соответствовал расчетному значению $T_6 = 1,28$ с. С точки зрения абсолютной величины параметра, наиболее чувствительными к уменьшению сопротивления оказались сила тока (максимум увеличивается на 40% в случае $0,01R$ по сравнению с номинальными данными) и угловая скорость массы $\Theta 2$ (максимальное значение возрастает на 38%). Момент сил упругости в связи и угло-

вая скорость массы $\Theta 1$ при столь существенном изменении сопротивления меняются незначительно – возрастают на 5–13%.

Выводы.

1. Установлено, что при существенном, по сравнению с современными электродвигателями, уменьшении активного сопротивления цепи двигателя в электромеханических системах, склонных к развитию биений за счет обмена энергией между механической и электрической системами, возможно активное проявление этого вредного, с точки зрения устойчивости работы и износа элементов системы явления. Для рассмотренной в работе системы признаки биений появляются при двукратном уменьшении сопротивления цепи якоря ЭД, при десятикратном понижении сопротивления колебания всех параметров системы становятся незатухающими. В системах с иными соотношениями параметров возможность проявления подобных явлений должна исследоваться особо.

2. Наиболее чувствительными к уменьшению активного сопротивления цепи якоря двигателя являются сила тока и скорость приводного органа машины. В рассмотренном случае их наибольшие значения возрастают примерно на 40% по сравнению со случаем пуска системы с номинальными параметрами электрической системы.

3. Возможное существенное увеличение размаха колебаний приводного рабочего органа машины (рис.3) может привести к нарушению управляемости приводом, особенно в случае, если какая-либо обратная связь системы управления будет основываться на текущем значении скорости этого элемента.

4. В данной работе, как и в [2], рассмотрена упрощенная расчетная схема ЭМС привода, в которой не учитывается влияние обратных связей в системе управления приводом и влияние нелинейностей в механической части привода. При практической оценке взаимодействия электрической и механической систем привода следует учитывать, что отрицательные обратные связи и ограничители силы тока привода могут существенно уменьшать частоту свободных колебаний электропривода. При введении положительных обратных связей увеличивается частота, уменьшается рассеяние энергии колебаний, снижается устойчивость привода и, как правило, при колебаниях усиливается взаимодействие электрической и механической систем привода. Указанные особенности ЭМС применительно к системам с уменьшенным активным сопротивлением цепи якоря должны быть исследованы дополнительно.

1. *Большаков В.И., Буцукин В.В.* Особенности и задачи исследования биений в приводах металлургических машин // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. ИЧМ.* – 2008. – Вып. 17. – С.267–276.
2. *Большаков В.И., Буцукин В.В.* Оценка возможности возникновения биений в электромеханической системе привода конвертера // *Защита металлургических машин от поломок: Межвуз. темат. сб. научн. тр. ПГТУ.– Мариуполь.* – 1999. – Вып. 4. – С.25–28.
3. *Большаков В.И.* Динамика машин и автоматизация металлургического оборудования // *Теория и практика металлургии.* – 2002. – № 5–6. – С.4–10.
4. *Большаков В.И.* Динамика электромеханических систем с зазорами // *Динамика крупных машин.* – М.:Машиностроение, 1969.– С.124–131.

5. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. – К.: Наукова думка, 1986. – 288 с.
6. *Экспериментальное исследование нагрузок в многодвигательном приводе наклона конвертера с редуктором–опорой / В.И.Большаков, В.И.Хоменко, В.В.Буцукин и др. // Металлург. и горноруд.пром–сть.– 1993. –№ 3. –С.56–60.*
7. *Цехнович Л.И.* Неустановившиеся процессы в крутильно–колебательной электромеханической системе и ее моделирование // Труды II Всесоюзного совещания по основным проблемам теории механизмов и машин. – М.: Машгиз, 1960. – С.222–234.
8. *Большаков В.И.* Динамическое взаимодействие электропривода и механической системы с упругими связями // «Модернизация и автоматизация оборудования прокатных станов». Труды ИЧМ. – Т. XXVII.– М.: Metallurgiya, 1967. – С.209–215.
9. *Большаков В.И.* Рассеяние энергии свободных колебаний электромеханической системы электродвигателей // В сб. «Рассеяние энергии при колебании упругих систем». – Киев: Наукова думка, 1968.–С.448 – 454.
10. *Уилсон М.* Сверхпроводящие магниты: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 405с.

*Статья рекомендована к печати:
Заместитель ответственного редактора
раздела «Металлургическое машиноведение»
канд.техн.наук В.В.Вернев
рецензент канд.техн.наук И.Б.Листопадов*

В.І.Большаков, В.В.Буцукін

Оцінка можливості розвитку биття в крутильній системі електромеханічного приводу

Метою роботи є дослідження процесу розвитку биття в двохмасовому електромеханічному приводі важких металургійних машин за рахунок обміну енергією між електричною і механічною системами. На основі математичного моделювання показано можливість виникнення биття в подібних системах, якщо співвідношення пружно–масових і електричних параметрів знаходиться в межах несприятливого діапазону. Показано, що при введенні позитивних зворотних зв'язків збільшується частота, зменшується розсіяння енергії коливань, знижується стійкість приводу і, як правило, при коливаннях посилюється взаємодія електричної і механічної систем приводу.