

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ БИЕНИЙ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ С ЗАЗОРОМ В УПРУГОЙ СВЯЗИ

В.И.Большаков¹, академик НАН Украины, д.т.н., профессор

В.В. Буцукин², к.т.н., доцент

¹ Институт черной металлургии НАН Украины (Днепропетровск, Украина)

² Приазовский государственный технический университет (Мариуполь, Украина)

Аннотация. Рассмотрены особенности возникновения биений в силовых цепях и электромеханических системах приводов машин. Изучено влияние на динамику переходных процессов зазора в упругой связи и рассеяния энергии колебаний электроприводом при уменьшении активного сопротивления в электродвигателе.

Ключевые слова: электромеханический привод машин, биения колебаний, динамические нагрузки, уменьшение омического сопротивления в цепи электропривода.

E-MAIL: butsukin@mail.ru

Колебательный процесс в виде биений силовых и кинематических параметров в электромеханических приводах машин горно-металлургической промышленности – явление достаточно широко распространенное и, в тоже время, недостаточно полно изученное в современном машиноведении [1, 2]. В рамках исследования этого явления выполнена оценка возможности развития биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами привода при использовании двигателя постоянного тока с независимым возбуждением [3]. Исследование выполнялось путем математического моделирования поведения системы (рис. 1), упруго-массовые и электрические параметры которой соответствовали выявленному ранее опасному, с точки зрения возможности развития биений, диапазону значений относительной разности собственных круговых

частот системы $\varepsilon_{\Delta\beta} < 0,33$. Здесь под относительной разностью частот $\varepsilon_{\Delta\beta}$ понимается отношение разности второй β_2 и первой β_1 круговой частот колебаний беззазорной ($\Delta = 0$) электромеханической системы к меньшей ее частоте β_1 . Результаты получены для системы, в упругой связи которой отсутствовала нелинейность в виде зазора ($\Delta = 0$, см. рис. 1) [3]. В связи с проводимыми исследованиями по уменьшению активного сопротивления R цепей электродвигателей (ЭД) в указанной работе изучалось влияние возможного уменьшения этого параметра на возникновение и развитие в системе биений за счет обмена энергией между ее электрической и механической подсистемами.

В исследовании [3] 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, можно ожидать увеличения динамических нагрузок и износа элементов системы явления. Для рассмотренной в работе системы признаки биений появлялись при двукратном уменьшении сопротивления цепи якоря ЭД по сравнению с существующим, а при десятикратном уменьшении сопротивления колебания всех параметров системы становятся практически незатухающими. Наиболее чувствительными к уменьшению активного сопротивления цепи якоря двигателя оказались сила тока и скорость приводного органа машины. В рассмотренном случае их наибольшие значения увеличивались приблизительно на 40 % по сравнению со случаем привода с номинальными параметрами электрической системы. В выводах работы [3] отмечалось, что одним из направлений

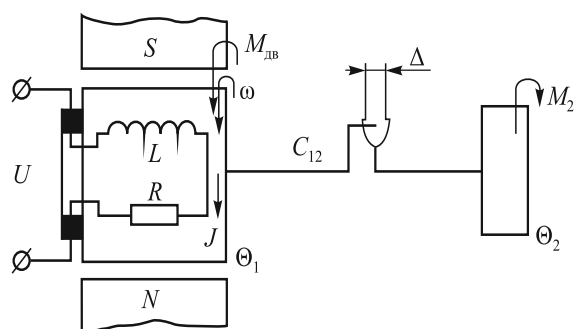


Рис. 1. Двухмассовая электромеханическая приведенная расчетная схема привода:

U – напряжение источника питания; L, R – индуктивность и активное сопротивление эквивалентной якорной цепи; J – ток в цепи якоря эквивалентного ЭД; Θ_1, Θ_2 – моменты инерции ротора ЭД и рабочего органа машины; C_{12} – крутильная жесткость упругой связи; $M_{дв}$ – момент, развиваемый ЭД; ω – угловая скорость якоря ЭД; M_2 – момент от внешней нагрузки; Δ – зазор в упругой связи

последующего исследования возможности развития биений в подобных системах должно быть изучение влияния нелинейности в ее электрической и механической системах на развитие переходных процессов. Следует подчеркнуть, что величина активного омического сопротивления в цепи якоря электродвигателя существенно влияет на рассеяние энергии колебаний. Задачей настоящей работы является изучение влияния нелинейности в виде зазора Δ в упругой связи C_{12} системы по рис. 1 и возникающих в этом случае биений на характер протекания в ней переходных процессов.

При исследовании использована двухмассовая электромеханическая система (см. рис. 1), которая состоит из механической системы (МС) и электрической системы ЭД. Базовые значения параметров системы, приведенные к валу ЭД, приняты по аналогии с [3]: момент инерции ротора 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 $C_{12} = 15\,300 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$; номинальная угловая скорость ротора ЭД $\omega_{\text{ном}} = 49,19 \text{ рад}^{-1}$; собственная частота двухмассовой МС $\beta_{\text{м1}} = 20,1 \text{ с}^{-1}$.

Номинальный момент эквивалентного ЭД $M_{\text{ном}} = 10\,570,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, номинальная сила тока $I_{\text{ном}} = 1300 \text{ А}$, номинальные индуктивность и активное сопротивление эквивалентной якорной цепи $L_{\text{ном}} = 0,664 \text{ мГн}$ и $R_{\text{ном}} = 0,0084 \text{ Ом}$ соответственно. Постоянные и частота эквивалентного ЭД: $Ce = 8,71 \text{ В}\cdot\text{с}^{-1}$; $Cm = 8,12 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$; $\beta_{\text{эд}} = 24,6 \text{ с}^{-1}$. Наибольшее расчетное значение зазора в упругой связи, приведенное к валу ЭД: $\Delta = 0,67 \text{ рад}$. Момент внешней нагрузки постоянный (25 % $M_{\text{ном}}$), направлен противоположно направлению движения якоря двигателя, моменты трения на массах с моментами инерции Θ_1 и Θ_2 равны нулю. В базовой системе, полученной на основе упрощения расчетной схемы привода наклона конвертера вместимостью 160 т, склонность к развитию биений за счет обмена энергией между ее электрической и механической системами отсутствует [3]. В связи с этим исследование выполнено с использованием видоизмененной системы, склонной к развитию биений. При неизменных, по сравнению с базовой системой электрических параметрах и $\Theta_1 = 175,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ в видоизмененной системе $\Theta_2 = 7,0 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $C_{12} = 4260,6 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}$, собственные круговые частоты $\beta_1 = 22,28 \text{ с}^{-1}$, $\beta_2 = 27,21 \text{ с}^{-1}$, $\epsilon_{\Delta\beta} = 0,22$. В системе возможно развитие биений с периодом $T_6 = 1,28 \text{ с}$.

Моделировалось поведение системы при пуске из неподвижного состояния с незакрученной упругой связью (момент сил упругости в связи M_{12} в начальный момент времени равняется нулю) при номинальной величине активного сопротивления $R = 0,0084 \text{ Ом}$, который существует в реальном поводе. Время пуска привода – 1,5 с (как и в принятом за базу поводе наклона конвертера). В отличие от исследованной ранее [3] системы в упругой связи имеется зазор $\Delta = 0,67 \text{ рад}$, полностью открытый перед пуском повода. Реакция системы исследовалась с помощью известной систе-

мы дифференциальных уравнений [4], которые описывают ее поведение. Решение уравнений осуществлялось методом Рунге–Кутты. Для удобства сравнения поведения различных вариантов системы численные результаты расчета и графики изменения параметров системы выводились на экран компьютера в относительных единицах:

$$i = \frac{I}{I_{\text{ном}}}, \quad m = \frac{M_{12}}{M_{\text{ном}}}, \quad w_1 = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{ном}}}, \quad w_2 = \frac{\omega_2}{\omega_{\text{ном}}}, \quad (1)$$

где I , M_{12} , ω_1 и ω_2 соответственно – абсолютные значения силы тока в цепи эквивалентного ЭД (А), момента сил упругости в связи C_{12} (Н·м), угловой скорости масс с моментами инерции Θ_1 (в дальнейшем – масса 1) и Θ_2 (далее – масса 2) по рис. 1 (рад⁻¹); i , m , w_1 и w_2 соответственно – относительные величины вышеуказанных параметров, определенные в долях от их номинальных значений.

В данном случае величины i , m , w_1 и w_2 являются, фактически, коэффициентами динамичности K_d , вычисленными относительно номинальных значений соответствующих параметров.

Для удобства сопоставления поведения безззорной системы и системы с зазором в таблице приведены полученные ранее параметры [3], характеризующие поведение безззорной системы (в строках с $\Delta = 0$). В таблице указаны круговая частота β , с которой колеблется соответствующий параметр, и наибольшее значение его коэффициента динамичности $K_{d\text{max}}$. На основе графиков дается характеристика колебательного процесса. Если в механической системе при выборе зазора возникают удары, то в таблице указывается их количество и промежуток времени, за который удары прекращаются. Результаты, полученные при моделировании поведения системы с зазором, приведены в таблице в строках, соответствующих $\Delta = 0,67 \text{ рад}$. Как и в работе [3], на первом этапе исследования моделировалось поведение склонной к развитию биений системы при базовых параметрах ее электрической системы (строка в таблице, соответствующая случаю активного сопротивления $R_{\text{ном}}$). Анализ графиков изменения кинематических и силовых параметров системы и данных таблицы свидетельствует, что пуск системы, потенциально склонной к развитию биений за счет обмена энергией между электрической и механической системами, при номинальных параметрах ЭД как в случае $\Delta = 0$, так и в случае зазора в упругой связи ($\Delta = 0,67 \text{ рад}$) 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 с, т.е. в течение 5 – 6 циклов колебаний). Таким образом, в исследованной системе при обычных значениях активного сопротивления биения не развиваются, что хорошо соотносится с известным фактом [5] благоприятного, с

Параметры системы по рис. 1 при пуске из неподвижного положения

Активное сопротивление цепи эквивалентного ЭД	Зазор в связи C_{12} , рад	Сила тока в цепи эквивалентного ЭД	Момент сил упругости в связи C_{12}
$R_{\text{ном}}$	$\Delta = 0$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,34$ Биения отсутствуют, колебания затухающие	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,53$ Биения отсутствуют, колебания затухающие
	$\Delta = 0,67$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,53$ Биения отсутствуют, колебания затухающие	3 удара, прекращаются через 1с, $K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,73$, затем затухающие колебания β_1
$0,50R_{\text{ном}}$	$\Delta = 0$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,49$ Просматривается один период биений с $T_6 \approx 1,28$ с, колебания затухают на 7-ой секунде	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,53$ Признаки проявления одного периода биений с $T_6 \approx 1,28$ с, колебания затухают после 5-ой секунды
	$\Delta = 0,67$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,76$ Биения отсутствуют, колебания затухают на 7-ой секунде	3 удара, прекращаются через 1 с, $K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,74$, затем затухающие колебания β_1
$0,10R_{\text{ном}}$	$\Delta = 0$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,76$ Биения, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,54$ Биения слабовыраженные, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие
	$\Delta = 0,67$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,90$ Биения, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	15 ударов, прекращаются через ~4,2 с, $K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,74$, затем слабозатухающие колебания β_1
$0,05R_{\text{ном}}$	$\Delta = 0$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,82$ Биения, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,55$ Биения слабовыраженные, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие
	$\Delta = 0,67$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,93$ Биения, $T_6 \approx 1,28$ с, колебания слабозатухающие	25 ударов, прекращаются через ~7,0 с, $K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,75$, затем слабозатухающие колебания β_1
$0,01R_{\text{ном}}$	$\Delta = 0$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,87$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 0,60$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с
	$\Delta = 0,67$	$\beta_1, K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,94$ Незатухающие биения, $T_6 \approx 1,28$ с	Непрерывные удары 3 – 4 в секунду с $K_{\text{д}_{\text{max}}}$ до 0,75

точки зрения успокоения колебаний, воздействия рассеяния энергии в активном сопротивлении якорной цепи на работу электромеханических приводов.

Для оценки влияния возможного, в перспективе, уменьшения активного сопротивления на динамические свойства привода, авторы приняли решение продолжить аналитическое исследование поведения системы при уменьшенных значениях активного сопротивления цепи якоря ЭД. Полагая все прочие параметры системы, склонной к развитию биений за счет обмена энергией между ее механической и электрической частями неизменными, моделировали поведение системы при уменьшенных значениях активного сопротивления – $0,5R$, $0,1R$, $0,05R$ и $0,01R$. Результаты расчетов приведены в таблице. На рис. 2 в качестве примера приведены графики для случая привода с уменьшенным в 100 раз активным сопротивлением якоря ($0,01R_{\text{ном}}$) и зазором в связи $C_{12} \Delta = 0,67$ рад, полностью открытым перед пуском.

Из данных таблицы видно, что для исследованного привода поведение беззазорной системы и системы с зазором с точки зрения наибольших нагрузок отличаются не радикально – увеличение максимальных значений в системе с зазором, по сравнению с беззазорной системой составляет для силы тока от 14 – 18 % для случаев с активным сопротивлением $R_{\text{ном}}$ ($K_{\text{д}_{\text{max}}}$ возрастает на 14 % с 1,34 до 1,53) и $0,5R_{\text{ном}}$ ($K_{\text{д}_{\text{max}}}$ возрастает на 18 % с 1,49 до 1,76) до 4 – 6 % при малых значениях активного сопротивления цепи якоря (случаи с $0,10R_{\text{ном}}$, $0,05R_{\text{ном}}$ и $0,01R_{\text{ном}}$ по таблице, при которых в системе без зазора $K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,76 – 1,87$, а в системе с зазором $K_{\text{д}_{\text{max}}} = 1,90 – 1,94$). Для момента сил упругости в связи – от 38 – 40 % при $R_{\text{ном}}$ ($K_{\text{д}_{\text{max}}}$ возрастает на 38 % с 0,53 до 0,73) и $0,5R_{\text{ном}}$ ($K_{\text{д}_{\text{max}}}$ возрастает на 40 % с 0,53 до 0,74) до 25 % при $0,01R_{\text{ном}}$ ($K_{\text{д}_{\text{max}}}$ возрастает на 25 % с 0,60 до 0,75). По мере уменьшения активного сопротивления наблюдается сближение показателей наибольших значений силовых факторов ($K_{\text{д}_{\text{max}}}$), ха-

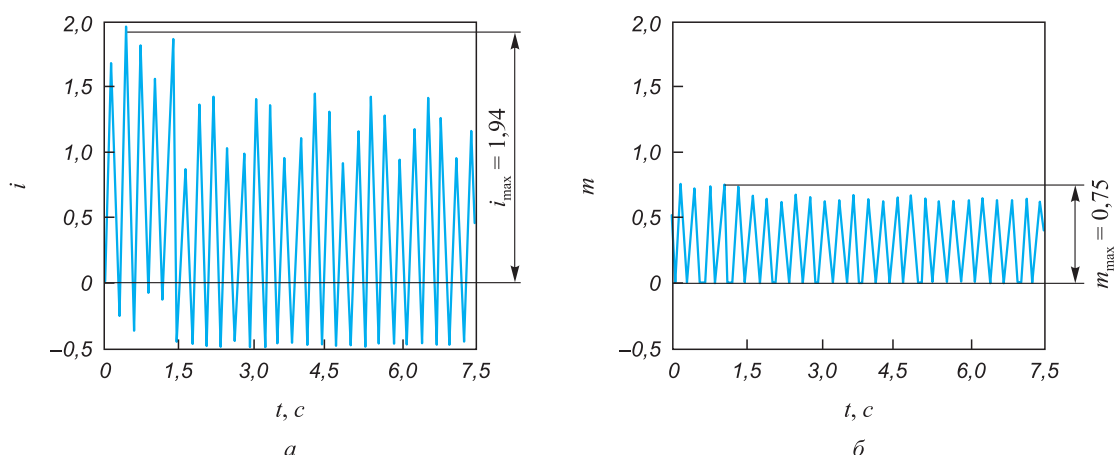


Рис. 2. Изменение относительных величин силы тока i эквивалентного ЭД (а) и момента сил упругости в связи $C_{12} m$ (б) в случае уменьшенного в 100 раз активного сопротивления якорной цепи и открытом начальном зазоре в упругой связи ($\Delta = 0,67$ рад)

характеризующих колебательные процессы в безззорной системе и системе с зазором. Влияние возможного уменьшения активного сопротивления цепи якоря на характер протекания колебательных процессов в приводе более существенно – по мере уменьшения активного сопротивления увеличивается число ударов в упругой связи, обусловленных замыканием зазора при пуске – от 3 ударов при $R_{\text{ном}}$ и $0,5R_{\text{ном}}$ до непрерывного ударного процесса раскрытия и закрытия зазора в связи при $0,01R_{\text{ном}}$. Уменьшение R создает, из-за уменьшения рассеяния энергии, благоприятные условия для развития биений в ЭМС. Признаки биений появляются в безззорной системе при уменьшении сопротивления до $0,5R_{\text{ном}}$, а в системе с зазором при $0,1R_{\text{ном}}$ (см. таблицу) возникают незатухающие биения. По мере уменьшения R биения становятся более выраженными, особенно в электрической части системы. Так, после окончания разгона привода, отношение максимума в первом периоде биений величины силы тока I_k соответствующему параметру второго цикла в системе с зазором возрастает – от 0,91 при $0,1R_{\text{ном}}$ до 0,94 при $0,05R_{\text{ном}}$ и до 1,00 при $0,01R_{\text{ном}}$. В последнем случае биения становятся незатухающими (см. рис. 2).

На характер движения и наибольшие отклонения от среднего значения скорости массы ротора ЭД 1 наличие зазора оказывает влияние незначительное – во всем диапазоне изменения активного сопротивления характер колебания массы 1 остается неизменным, а наибольшие значения скорости отличаются не более, чем на 1 – 2 %.

Как и для массы 1, наличие зазора не оказывает существенного воздействия на характер движения массы 2 – при одинаковых значениях активного сопротивления колебания массы 2 качественно идентичны в безззорной системе и системе с зазором (см. таблицу). Наибольшие отклонения от среднего значения скорости для массы 2 составляют в системе с зазором примерно +11 % по сравнению с безззорной системой (см. таблицу) при $R_{\text{ном}}$ и $0,5R_{\text{ном}}$. По мере уменьшения активно-

го сопротивления наибольшие отклонения от среднего значения скорости массы 2 у безззорной системы и системы с зазором сближаются и при $0,01R_{\text{ном}}$ составляют около 4 %.

Поскольку уменьшение активного (омического) сопротивления цепи якоря электродвигателя позволяет ощутимо сократить расход электроэнергии и одновременно уменьшает затухание динамических процессов, то, по мнению авторов, для ограничения динамических нагрузок и увеличения рассеяния энергии колебаний следует применять дополнительные средства. Одним из таких средств является применение в приводах машин резино-металлических соединений, которые могут применяться в виде муфт, соединяющих привод и машину. Практика применения резино-металлических муфт показала, что наряду с уменьшением величин зазоров в приводе эти муфты обеспечивают увеличение рассеяния энергии колебаний. В связи с этим следует провести дополнительные исследования возможности применения резино-металлических муфт в сочетании с электродвигателями, у которых уменьшено сопротивление якорной цепи, для оценки суммарных показателей рассеяния энергии и предотвращения биений в колебательных процессах.

Выводы. Исследование ранее изученной [3] безззорной электромеханической системы и такой же системы с зазором в упругой связи (см. рис. 1) показало, 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 опасного, с точки зрения стабильности работы, динамических нагрузок и износа элементов системы явления.

Для безззорной системы и системы с зазором признаки биений появляются при двукратном уменьшении сопротивления цепи якоря двигателя, а при десятикратном уменьшении сопротивления колебания всех пара-

метров беззазорной системы становятся незатухающими. В системе с зазором это явление имеет место при двадцатикратном уменьшении активного сопротивления по сравнению с существующим приводом.

Возникновение практически незатухающих колебаний вследствие уменьшения рассеяния их энергии неизбежно приведет к ускоренному усталостному разрушению деталей привода.

Качественное и количественное отличие колебательных процессов в беззазорной и зазорной системах нивелируются по мере уменьшения активного сопротивления цепи якоря двигателя. Так, различие наибольших значений силы тока уменьшается с 14 – 18 % при $R = (1,00 - 0,50)R_{\text{ном}}$ до 6 % при $R = 0,01R_{\text{ном}}$. Для момента сил упругости в связи – от 38 – 40 % при $R = (1,00 - 0,50)R_{\text{ном}}$ до 25 % при $R = 0,01R_{\text{ном}}$. Скорость якоря ЭД в системе с зазором отличается не более, чем на 1 – 2 % от скорости в беззазорной системе. Для скорости рабочего органа (масса 2 с моментом инерции Θ_2 по рис. 1) это отличие более существенно – от 11 % при $R_{\text{ном}}$ и $0,5R_{\text{ном}}$ до 4 % при $0,01R_{\text{ном}}$. По мере уменьшения активного сопротивления наибольшие отклонения от среднего значения скорости массы 2 у беззазорной системы и системы с зазором сближаются аналогично силе тока и моменту упругости в связи.

Указанные особенности электромеханической системы привода применительно к системам с уменьшенным активным сопротивлением цепи якоря должны быть учтены при их проектировании и настройке. Следует также выполнить оценку эффективности применения резино-металлических муфт совместно с электродвигателями такого типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кожевников С.Н. Динамика нестационарных процессов в машинах. – Киев: Наукова думка, 1986.
2. Веренев В.В., Большаков В.И., Путники А.Ю. и др. Динамические процессы в клетях широкополосного стана 1680. – Днепропетровск: ИМА-Пресс, 2011.
3. Большаков В.И., Буцукин В.В. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научных трудов ИЧМ. – Киев: Наукова думка. Вып. 20. С. 291 – 300.
4. Большаков В.И. Динамика электромеханических систем с зазорами / Динамика крупных машин. – М.: Машиностроение, 1969. С. 124 – 131.
5. Большаков В.И. Рассеяние энергии свободных колебаний электромеханической системы электродвигателей / Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем. – Киев: Наукова думка, 1968. С. 448 – 454.

© 2014 г. В.И. Большаков, В.В. Буцукин
Поступила 18 сентября 2013 г.

FEATURES OF BEATS IN ELECTROMECHANICAL DRIVE WITH CLEARANCES IN ELASTIC COUPLING

V.I. Bol'shakov¹, Academician of the NAS of Ukraine, Dr. Eng., Professor
V.V. Bucukin², Cand. Eng., Assist. Professor

¹ Institute of ferrous metallurgy named after Z.I. Nekrasova NAS (Dnepropetrovsk, Ukraine)

² Azov State Technical University (Mariupol', Ukraine)

E-MAIL: butsukin@mail.ru

Abstract. The features of appearance of beats in power chains of beat-machine in electromechanical systems of traction mechanisms are considered. The authors studied the influence on the dynamics of gap transients in elastic connection and scattering of energy oscillation by electric drive, with a decrease of active resistance in the electric motor.

Keywords: electromechanical traction mechanism of machine, beating of oscillation, dynamic load, decrease of ohmic resistance in an electric drive chain.

REFERENCES

1. Kozhevnikov S.N. *Dinamika nestacionarnykh processov v mashinah* (Dynamics of non-stationary processes in machines). Kiev: Naukova dumka. 1986.

2. Verenev V.V., Bol'shakov V.I., Putniki A.Ju. etc. *Dinamicheskie processy v kletjah shirokopolosnogo stana 1680* (Dynamic processes in stands of hot-strip mill 1680). Dnepropetrovsk: IMA-Press. 2011.
3. Bol'shakov V.I., Bucukin V.V. *Ocenka vozmozhnosti razvitiya bienij v krutyl'noj sisteme jelektromehaničeskogo privoda, Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii. Sb. nauchnykh trudov IChM* (Assessing the possibility of development of beats in torsional electromechanical drive system, in Fundamental and applied problems of the steel industry: Proceedings of Institute of Ferrous Metallurgy). Kiev. Naukova dumka. 2009. Issue 20. Pp. 291 – 300.
4. Bol'shakov V.I. *Dinamika krupnykh mashin* (Dynamics of large machines). Moscow: Mashinostroenie. 1969. Pp. 124 – 131.
5. Bol'shakov V.I. *Rassejanie jenerгии svobodnykh kolebanij jelektromehaničeskoy sistemy jelektrodvigatelej, V sb. «Rassejanie jenerгии pri kolebanijah uprugih sistem»* (Energy dissipation of free oscillations of the electromechanical motor system, in Dissipation of energy in the vibrations of elastic systems). Kiev: Naukova dumka. 1968. Pp. 448 – 454.

Received September 18, 2013