

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ МИНИМИЗАЦИИ НАГРУЗОК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ АКТИВНОМ ОГРАНИЧЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ УПРУГИХ МЕХАНИЗМОВ

Г.Я. Пятибратов

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, г. Новочеркасск*

Рассмотрены активные способы демпфирования колебаний и ограничения динамических нагрузок в упругих передачах механизмов, которые реализуются благодаря созданию дополнительных управляющих воздействий электропривода. Целью исследований является определение условий, позволяющих минимизировать требуемые энергетические затраты электропривода при применении активных способов ограничения динамических нагрузок в упругих механических передачах.

Получены аналитические выражения для определения минимально возможных значений момента (тока) двигателя и ЭДС питающего его преобразователя, необходимых для заданного уменьшения динамических усилий механизмов. Определены условия минимизации момента двигателя и ЭДС преобразователя при реализации активных способов ограничения динамических усилий упругих механизмов.

Установлено, что для эффективного применения активных способов необходимо, чтобы канал ограничения динамических усилий механизмов обеспечил изменение составляющей момента от дополнительного управляющего воздействия в противофазе с усилием в упругом элементе механической передачи, что позволит минимизировать энергетические затраты электропривода.

Приведены примеры практической реализации активного способа ограничения динамических усилий упругих механизмов в реальных условиях промышленной эксплуатации

Ключевые слова: электропривод, упругая передача, ограничение усилий механизмов.

Актуальность проблемы

Стремление к увеличению производительности рабочих машин приводит к интенсификации динамических режимов их приводов, что способствует увеличению нагрузок в передачах и металлоконструкциях [1]. Эта проблема становится особенно актуальной при наличии упругих передач и конструкций рабочих машин, когда максимальные значения усилий в упругих элементах (УЭ) механизмов могут в 2–3 раза превышать установившиеся значения, что ведёт к ускоренному их износу, снижает надёжность и производительность работы оборудования, ухудшает показатели технологических процессов [2].

В настоящее время используют различные способы уменьшения отрицательного влияния упругих колебаний на работу механизмов. Применение механических демпфирующих устройств в кинематических схемах механизмов может уменьшить колебания, однако приводит к усложнению конструкции, увеличению массы и размеров рабочих машин [3].

Появление в эксплуатации быстродействующих электроприводов (ЭП) позволило возложить на них дополнительную функцию демпфирования упругих колебаний [4] и активного ограничения динамических усилий механизмов [5].

Пассивные способы демпфирования упругих колебаний основаны на диссипации энергии колебаний механизмов в силовых электрических цепях ЭП. Выполненные в [6] исследования определили воз-

можности ЭП по уменьшению усилий упругих механизмов и области рационального применения пассивных способов. Полученные результаты показали, что достижимая эффективность пассивных способов демпфирования колебаний в УЭ ограничена и часто не обеспечивает технологические требования функционирования современных электромеханических систем с упругими связями (ЭМС с УС) [4].

Активные способы предполагают организацию в системе ЭП дополнительных силовых управляющих воздействий, способных обеспечить уменьшение динамических усилий в механических передачах до требуемых значений [7]. В этом случае в систему управления ЭП добавляют канал ограничения динамических нагрузок (КОДН), использующий при работе информацию о реальных значениях усилий в УЭ механических передач [8]. Исследования показали, что при практической реализации активного способа ограничения динамических усилий в УЭ механизмов в ЭП могут возникать значительные токи двигателя и потребоваться увеличение напряжения питающего его преобразователя [9], что потребует завышения мощности ЭП, снижает эффективность и ограничивает область применения активных способов.

Определение требуемого момента двигателя и напряжения питающего его преобразователя, нахождение условий их минимизации при реализации активного способа ограничения колебаний усилий в УЭ представляет актуальную задачу, имеющую теоретическое и практическое значение.

Постановка задачи исследований

Активные способы демпфирования колебаний в УЭ механических передач с помощью ЭП обеспечивают уменьшение усилий в механических передачах до требуемых значений. Для создания систем управления ЭП способных реализовать активные способы необходимо комплексно решить ряд задач: определить необходимые энергетические характеристики и динамические показатели ЭП, выполнить синтез требуемой структуры и параметров управляющего устройства, реализовать информационное обеспечение процессов управления, способных обеспечить желаемое качество работы ЭМС с УС [8].

На начальных этапах проектирования ЭМС с УС необходимо оценить возможность реализации активного способа уменьшения динамических усилий в УЭ механизмов, определить дополнительные нагрузки, возникающие в ЭП, найти основные влияющие факторы и условия минимизации требуемой мощности электродвигателя и питающего его преобразователя.

Исследование координат ЭП, определяющих его энергетические затраты, при реализации активных способов, нахождение условий их минимизации – это важная задача, которая должна решаться при создании таких ЭМС с УС. В этом случае факторами, ограничивающими возможности ЭП, могут быть предельно допустимые значения координат силовой части привода: запасы по напряжению преобразователя и значение момента (тока) двигателя. Поэтому решение рассматриваемой задачи состоит в том, чтобы при известных возмущающих воздействиях найти минимальные значения ограничивающих координат ЭП, при которых можно осуществить требуемое ограничение динамических усилий в передачах исследуемой ЭМС с УС.

Математическое описание исследуемой системы

Анализ математических моделей ЭМС с УС различных технологических машин показал, что на практике наиболее часто встречаются меха-

низмы, имеющие рядное расположение инерционных масс, соединенных упруго-диссипативными связями [10]. Поэтому в настоящее время при исследовании упругих колебаний ЭМС с УС наиболее часто применяют эквивалентные двухмассовые расчётные схемы механической части системы, которые учитывают основные особенности систем рассматриваемого класса [2]. Обобщенное линейаризованное математическое описание эквивалентной двухмассовой ЭМС с системой подчиненного регулирования (СПР) координат ЭП представлено на рис. 1 в виде направленного графа Мэйсона [11].

Узлам графа соответствуют координаты исследуемой системы, представленные в относительных безразмерных единицах. Момент двигателя, нагрузочный момент M_B , момент в упругом элементе (УЭ) M_y выражены в долях от базового номинального момента двигателя M_H ; скорости двигателя Ω_d и механизма Ω_M – в долях от базовой скорости идеального холостого хода Ω_0 двигателя; напряжение преобразователя U_{Π} – в долях от базового номинального напряжения двигателя U_H . Базовые значения координат управляющего устройства, задающего напряжения U_3 , напряжений на выходе регуляторов скорости (РС) U_{PC} и тока (РТ) U_{PT} выбраны таким образом, чтобы статические коэффициенты каналов обратных связей были равны единице.

Передачи ветвей графа, характеризующие свойства элементов неизменяемой части ЭМС, записанные с использованием преобразования Лапласа, представлены в таблице.

В таблице обозначено: k_{Π} и T_{Π} – коэффициент усиления и постоянная времени преобразователя; k_3 – коэффициент передачи двигателя; T_3 – постоянная времени, учитывающая электромагнитную инерционность ЭП; $T_d = J_1(\Omega_0/M_H)$ и $T_M = J_2(\Omega_0/M_H)$ – эквивалентные постоянные

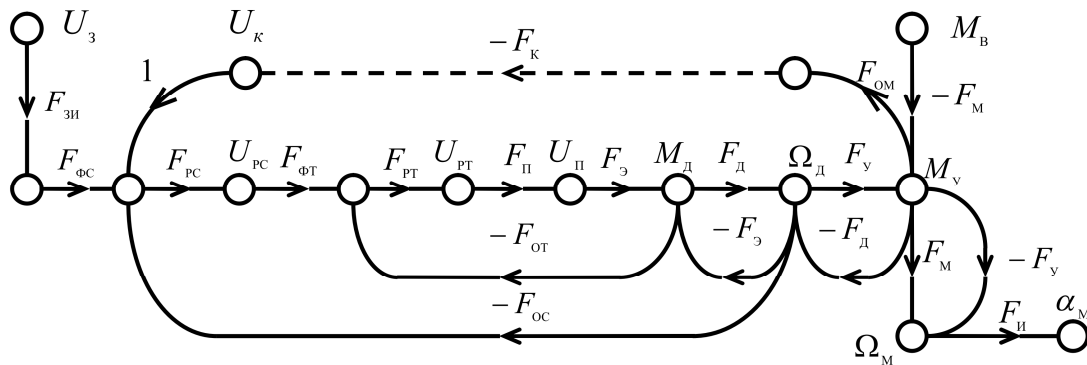


Рис. 1. Направленный граф исследуемой ЭМС

Передачи ветвей направленного графа неизменяемой части ЭМС

Ветвь графа	F_{Π}	F_{Θ}	F_{Δ}	F_{Υ}	F_M
Передача ветви	$\frac{k_{\Pi}}{T_{\Pi}S+1}$	$\frac{k_{\Theta}}{T_{\Theta}S+1}$	$\frac{k_{\Delta}}{T_{\Delta}S}$	$\frac{T_d S+1}{T_C S}$	$\frac{k_M}{T_M S}$

времени электродвигателя и механизма; J_1 и J_2 – приведенные к валу двигателя моменты инерции масс, разделенных УЭ; $T_C = (1/c_y)(M_H/\Omega_0)$ – постоянная времени эквивалентной жесткости механической передачи; $T_d = b_y/c_y$ – постоянная времени диссипативных сил в УЭ; c_y и b_y – приведенные к валу двигателя коэффициенты жесткости и внутреннего вязкого трения механической передачи. Перемещение механизма α_M связано с его скоростью Ω_M оператором интегрирования $F_{\Pi}(S) = 1/(T_{\Pi}S)$.

В управляющем устройстве передача ветви РС F_{PC} (см. рис. 1) может быть представлена в виде $F_{PC}(S) = k_{PC}$ в случае реализации однократно-интегрирующей СПР или $F_{PC}(S) = k_{PC}(T_{PC}S+1)/(T_{PC}S)$ при реализации двукратно-интегрирующей системы. Регулятор тока двигателя учитывается ветвью графа F_{PT} с передачей $F_{PT}(S) = k_{PT}(T_{PT}S+1)/(T_{PT}S)$. Динамические свойства каналов обратных связей по току, скорости и моменту в УЭ учитываются ветвями F_{OT} , F_{OC} и F_{OM} , имеющими передачи $F_O(S) = k_O/(T_O S+1)$. Передача F_K учитывает свойства корректирующего устройства, обеспечивающего требуемое уменьшение динамических нагрузок в УЭ механизмов.

Решение задачи минимизации дополнительных нагрузок электропривода

Целью исследования является получение и анализ аналитических выражений, позволяющих определить добавочные значения ЭДС преобразователя E_{Π} и момента двигателя M_{Δ} , возникающих при активном ограничении динамических усилий в ЭМС с УС, а так же найти условия их минимизации. При такой постановке задачи на начальных этапах исследования допустимо счи-

тать, что управляющее устройство исследуемой системы позволяет реализовать любой закон регулирования в пределах энергетических ограничений, присущих силовой части ЭП. Применение такого подхода позволяет определить требуемые параметры ЭП до решения задачи синтеза системы управления усилиями в УЭ механических передач. Учитывая, что в данном исследовании не рассматриваются вопросы реализации канала ограничения динамических нагрузок (КОДН), его требуемые свойства предлагается учитывать дополнительным корректирующим сигналом U_K .

Значения момента двигателя M_{Δ} и ЭДС преобразователя E_{Π} будем определять при изменении возмущающего воздействия M_B , задавая требуемое уменьшение момента в УЭ механизма комплексным коэффициентом k_M

$$k_M(S) = M_{\Upsilon}(S)/M_{\Upsilon B}(S), \quad (1)$$

где $M_{\Upsilon}(S)$ – операторное изображение суммарного момента в УЭ при изменении возмущающего M_B воздействия и дополнительного управляющего сигнала U_K ; $M_{\Upsilon B}(S)$ – операторное изображение составляющей момента в УЭ в исходной системе при изменении только возмущающего воздействия M_B .

При линеаризации исследуемой ЭМС с УС, применив принцип суперпозиции, получим

$$M_{\Upsilon}(S) = M_{\Upsilon B}(S) + M_{\Upsilon K}(S), \quad (2)$$

где $M_{\Upsilon K}(S)$ – операторное изображение составляющей момента в УЭ при действии дополнительного управляющего сигнала U_K , обеспечивающего заданное коэффициентом k_M уменьшение момента M_{Υ} .

Применив правило Мэйсона [12] к графу на рис. 1, найдем операторные изображения для составляющих момента в УЭ от возмущающего воздействия M_B и управляющего сигнала U_K , заданного на вход РС:

$$M_{\Upsilon B}(S) = \frac{F_{\Upsilon}(S) F_M(S) [1 + F_{O1}(S) + F_{O2}(S) + F_{O3}(S)]}{D_{\Theta}(S)} M_B(S); \quad (3)$$

$$M_{\Upsilon K}(S) = \frac{F_{PC}(S) F_{\Phi T}(S) F_{PT}(S) F_{\Pi}(S) F_{\Theta}(S) F_{\Delta}(S) F_{\Upsilon}(S)}{D_{\Theta}(S)} U_K(S), \quad (4)$$

где $D_{\Delta}(S) = 1 + F_{01}(S) + F_{02}(S) + F_{03}(S) + F_{04}(S) [1 + F_{02}(S)] + F_{05}(S) [1 + F_{01}(S) + F_{02}(S) + F_{03}(S)]$ – определитель графа, характеризующий свойства исследуемой системы;

$F_{01}(S) = F_{PC}(S) F_{\Phi T}(S) F_{PT}(S) F_{\Pi}(S) F_{\Delta}(S) F_{OC}(S)$, $F_{02}(S) = F_{PT}(S) F_{\Pi}(S) F_{\Delta}(S) F_{OT}(S)$, $F_{03}(S) = F_{\Delta}(S) F_{D}(S)$, $F_{04}(S) = F_{Y}(S) F_{D}(S)$, $F_{05}(S) = F_{Y}(S) F_{M}(S)$ – петлевые передачи графа.

Подставив в выражение (1) уравнения (2)–(4), определим требуемое корректирующее воздействие U_K в зависимости от заданного коэффициентом k_M ограничения момента M_Y при изменении возмущения M_B :

$$U_K(S) = [k_M(S) - 1] \frac{F_M(S) [1 + F_{01}(S) + F_{02}(S) + F_{03}(S)]}{F_{PC}(S) F_{\Phi T}(S) F_{PT}(S) F_{\Pi}(S) F_{\Delta}(S) F_{OC}(S)} M_B(S). \quad (5)$$

С использованием правила Мэйсона найдём выражения для добавочной ЭДС преобразователя $E_{ПК}$ и момента двигателя M_K при действии в системе корректирующего сигнала U_K :

$$E_{ПК}(S) = \frac{F_{PC}(S) F_{\Phi T}(S) F_{PT}(S) F_{\Pi}(S) [1 + F_{03}(S) + F_{04}(S) + F_{05}(S) + F_{03}(S) F_{05}(S)]}{D_{\Delta}(S)} U_K(S); \quad (6)$$

$$M_{ДК}(S) = \frac{F_{PC}(S) F_{\Phi T}(S) F_{PT}(S) F_{\Pi}(S) F_{\Delta}(S) [1 + F_{04}(S) + F_{05}(S)]}{D_{\Delta}(S)} U_K(S). \quad (7)$$

Подставив в выражения (6) и (7) значения U_K из (5) и выполнив преобразования, получим значения ограничивающих координат ЭП при реализации активного способа:

$$E_{ПК}(S) = [k_M(S) - 1] \frac{F_{05}(S)}{F_{\Delta}(S)} \left[\frac{1 + F_{03}(S)}{F_{04}(S)} + \frac{F_{01}(S) - F_{02}(S) F_{03}(S)}{D_{\Delta}(S)} \right] M_B(S); \quad (8)$$

$$M_{ДК}(S) = [k_M(S) - 1] \frac{F_M(S)}{F_{D}(S)} \left\{ 1 + \frac{F_{05}(S) [F_{01}(S) + F_{03}(S)]}{D_{\Delta}(S)} \right\} M_B(S). \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показал, что момент двигателя, необходимый для реализации активного способа, определяется в основном требуемым уменьшением упругих динамических усилий и отношением моментов инерции разделённых УЭ.

Если выражения (8), (9) проанализировать с учетом зависимостей исследуемых координат ЭМС с УС от возмущающего воздействия M_B в исходной системе:

$$E_{ПВ}(S) = \frac{F_{05}(S)}{F_{\Delta}(S)} [F_{01}(S) - F_{02}(S) F_{03}(S)] \frac{1}{D_{\Delta}(S)} M_B(S); \quad (10)$$

$$M_{ДВ}(S) = F_{05}(S) [F_{01}(S) + F_{03}(S)] \frac{1}{D_{\Delta}(S)} M_B(S), \quad (11)$$

то полученные ранее выражения можно представить в более компактной форме:

$$E_{ПК}(S) = [k_M(S) - 1] \left[\frac{F_M(S)}{F_{D}(S)} \cdot \frac{1 + F_{03}(S)}{F_{\Delta}(S)} M_B(S) + E_{ПВ}(S) \right], \quad (12)$$

$$M_{ДК}(S) = [k_M(S) - 1] \left[\frac{F_M(S)}{F_{D}(S)} M_B(S) + M_{ДВ}(S) \right]. \quad (13)$$

Полные выражения для ограничивающих координат ЭП можно получить с учётом выражений (10)–(13) путем сложения составляющих от возмущающего M_B и управляющего U_K воздействий:

$$E_{\Pi}(S) = E_{ПВ}(S) + E_{ПК}(S) = [k_M(S) - 1] \frac{F_M(S)}{F_{D}(S)} \left[\frac{1}{F_{\Delta}(S)} + F_{D}(S) \right] M_B(S) + k_M(S) E_{ПВ}(S), \quad (14)$$

$$M_{D}(S) = M_{ДВ}(S) + M_{ДК}(S) = [k_M(S) - 1] \frac{F_M(S)}{F_{D}(S)} M_B(S) + k_M(S) M_{ДВ}(S). \quad (15)$$

По полученным выражениям, зная характеристики возмущающего воздействия и параметры неизменяемой части системы, можно найти значения ограничивающих координат ЭП. Анализ путей прохождения сигнала дополнительного управляющего сигнала U_K на графе рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что перенос управляющего сигнала U_K , например на вход РТ двигателя, не приведет к изменению полученных выражений.

Анализ полученных выражений при решении поставленной задачи наиболее удобно выполнять с использованием частотных методов. В этом случае удастся легко и наглядно определить условия ограничения момента M_Y на векторной комплексной плоскости [13]. Определим условия, обеспечивающие требуемое уменьшение амплитуды колебаний момента в УЭ при минимально возможном значении ограничивающей координаты ЭП.

Исследования показали, что если минимизировать и момент двигателя M_D , то наиболее эффективное уменьшение момента M_Y будет достигаться при выполнении на любой частоте условия

$$M_Y(j\omega) = M_{YB}(j\omega) + M_{YK}(j\omega), \quad (16)$$

$$\arg M_{YK}(j\omega) = [\arg M_{YB}(j\omega) \pm 180^\circ],$$

где $\arg M_{YK}(j\omega)$ – угол сдвига между векторами момента $M_{YK}(j\omega)$ и управляющего воздействия $U_K(j\omega)$; $\arg M_{YB}(j\omega)$ – угол сдвига между векторами момента $M_Y(j\omega)$ и возмущающего воздействия $M_B(j\omega)$.

При выполнении условия (16) можно обеспечить требуемое уменьшение момента в УЭ при наименьшем значении $\text{mod } M_{YK}(j\omega)$, а значит и $\text{mod } M_D(j\omega)$.

При условии коллинеарности векторов $M_Y(j\omega)$ и $M_{YB}(j\omega)$, коэффициент $k_M(j\omega)$, учитывающий требуемое уменьшение амплитуды $M_Y(\omega)$, будет действительным числом, изменяющимся от нуля до единицы. Значению $k_M = 0$ будет соответствовать полная компенсация составляющей момента в УЭ, а при значении $k_M = 1$ ограничение момента в УЭ отсутствует.

Исследование полученного условия

Анализ полученных выражений затруднен, поэтому целесообразно осуществить их исследование на ЭВМ с параметрами конкретных ЭМС с УС. Исследование ЭМС с УС выполним с использованием частотных методов при параметрах неизменяемой части системы: $T_{II} = 0,007$ с;

$k_{\Sigma} = 8,4$; $T_{\Sigma} = 0,132$ с; $T_D = 1,2$ с; $T_C = 0,0134$ с; $T_d = 0,005$ с; $T_M = 0,38$ с и применении однократно интегрирующей СПР с пропорциональным РС при $k_{PC} = 19,2$ и РТ с параметрами $k_{PT} = 0,52$, $T_{PT} = 0,132$ с.

Решение задачи синтеза в [8] показало, что при достаточном быстродействии ЭП эффективное ограничение динамических моментов в УЭ можно получить при дополнительном управляющем сигнале $U_K(S) = [k_{K1}T_K S / (T_K S + 1)] M_{YB}(S)$, при значениях $k_{K1} = 0,14$ и $T_K = 0,2$ с. Исследования показали, что при полученном управляющем воздействии можно обеспечить снижение максимального момента в УЭ на резонансной частоте $\text{mod } M_{YK}(j\omega)$ до значения, определяемого коэффициентом динамичности $k_{ДВ}(\omega) = M_Y(\omega) / M_B(\omega) = 1,2$.

На рис. 2 показаны вектора момента в УЭ $M_{YЭ}(j\omega_P)$ и момента двигателя $M_{DЭ}(j\omega_P)$ на резонансной частоте в исходной системе, а так же вектора $M_{YK}(j\omega_P)$ и $M_{DK}(j\omega_P)$ при действии КОДН. Анализ расположения векторов исследуемых координат на комплексной частотной плоскости показал, что полученное активное ограничение усилий в системе с КОДН эффективно, с точки зрения минимизации энергетических затрат ЭП.

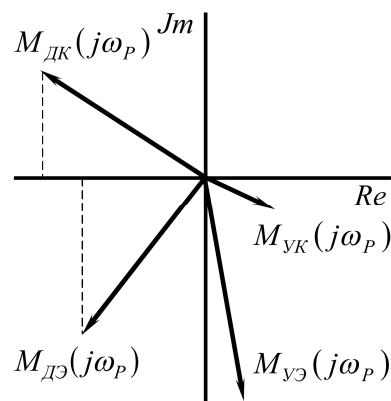


Рис. 2. Положение векторов силовых координат исследуемой ЭМС

При ограничении момента в УЭ механических передач составляющая момента M_{DK} , практически коллинеарная моменту M_{YK} , а полученный эффект уменьшения усилия в УЭ достигнут практически без увеличения момента двигателя при $M_{DK}(\omega_P) \approx M_{DЭ}(\omega_P)$.

Практическую эффективность реализации активного способа иллюстрируют переходные процессы режима стопорения ЭП механизма напора экскаватора в исходной ЭМС с УС и в системе с КОДН [14].

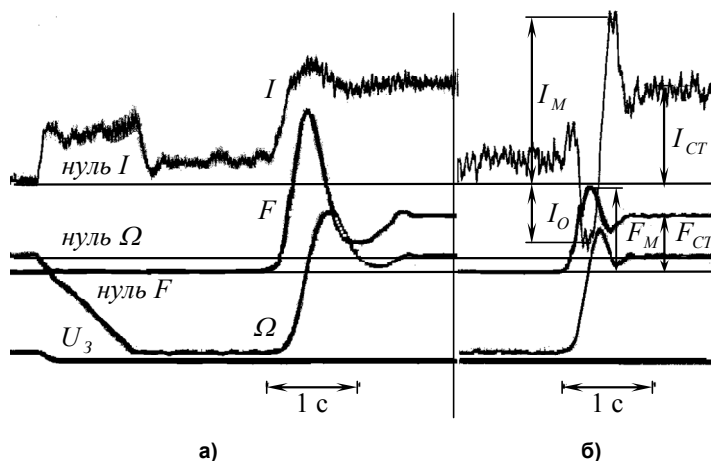


Рис. 3. Осциллограммы процесса стопорения электропривода: а – в исходной ЭМС с УС; б – в системе с КОДН

На рис. 3 показаны осциллограммы: задающего напряжения U_3 , тока I и скорости вращения Ω двигателя, а также усилия в УЭ передачи F .

Сопоставление приведенных осциллограмм показывает: уменьшение максимальных значений усилия F_M в УЭ передачи произошло в 1,9 раза благодаря интенсивному снижению скорости двигателя Ω . Анализ рис. 3, б показал, что в процессе активного ограничения усилий в упругой канатной механической передаче ток двигателя с максимальным значением I_0 изменяется практически в противофазе с максимальным усилием F_M в УЭ.

Практическое использование результатов исследований

Полученные результаты исследований были использованы при реализации активного способа ограничения динамических нагрузок в упругих передачах механизма напора карьерного экскаватора типа ЭКГ-4,6Б [15], копающих механизмов экскаватора ЭКГ-20 [16], а также при активном демпфировании упругих колебаний скорости исполнительных механизмов сбалансированного манипулятора типа МП-100 [17]. Предлагаемый метод определения условий минимизации динамических нагрузок ЭМС с УС при реализации активных способов может быть использован в других отраслях техники.

Заключение

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Эффективность активных способов демпфирования колебаний и уменьшения динамических усилий механизмов может ограничиваться запасами напряжения преобразователя, перегрузочной способностью двигателя по току.

2. В ряде случаев при неблагоприятном соче-

тении параметров ЭМС с УС возникающие при реализации активного способа ограничения динамических усилий в упругих передачах механизмов запас по напряжению преобразователя и максимальный момент двигателя могут превышать допустимые значения, что потребует увеличения мощности двигателя и питающего его преобразователя.

3. При практической реализации активного способа ограничения динамических нагрузок необходимо, чтобы дополнительное управляющее воздействие в системе управления ЭП обеспечило изменение момента электродвигателя в противофазе с моментом в упругом элементе механической передачи.

Результаты работы получены при поддержке гранта по проекту № 2878, выполняемого в рамках базовой части государственного задания № 2014/143.

Литература

1. Кожевников, С.Н. Динамика машин с упругими звеньями / С.Н. Кожевников.– Киев: АН УССР, 1961. – 159 с.
2. Ключев, В.И. Ограничение динамических нагрузок электроприводов / В.И. Ключев.– М.: Машиностроение, 1971. – 383 с.
3. Пятибратов, Г.Я. Эффективность параметрических способов демпфирования упругих колебаний механизмов / Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 29–33.
4. Пятибратов, Г.Я. Предельные возможности электропривода при демпфировании колебаний упругих механизмов / Г.Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика, 2014, № 4. – С. 63–68.
5. Левинтов, С.Д. Об использовании электропривода для ограничения динамических нагрузок в передачах / С.Д. Левинтов, Г. Я. Пятибратов // Изв. вузов. Электромеханика. – 1978. – № 10. – С. 1096–1102.

6. Пятибратов, Г.Я. Оптимизация систем подчиненного регулирования электроприводов при учете упругости механических передач / Г.Я. Пятибратов // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 1986. – № 6. – С. 72–82.
7. Пятибратов, Г.Я. Возможности применения электроприводов для активного ограничения колебаний упругих механических передач / Г.Я. Пятибратов // *Изв. вузов Электромеханика.* – 1990. – № 10. – С. 89–93.
8. Пятибратов, Г.Я. Построение систем управления электроприводами, обеспечивающих ограничение динамических нагрузок в механических передачах рабочих машин / Г.Я. Пятибратов // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 1979. – № 8. – С. 709–713.
9. Пятибратов, Г.Я. О нагрузках электропривода при ограничении им динамических моментов в упругих элементах механизмов / Г.Я. Пятибратов, С.Д. Левинтов // *Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей.* – Челябинск: ЧПИ, 1977. – Вып. 196. – С. 146–150.
10. Скучик, Е. Простые и сложные колебательные системы / Е. Скучик. – М.: Мир, 1971. – 557 с.
11. Mason, S.I. Feedback theory further properties of signal flow graphs / S.I. Mason // *Proc. Inst. Radio Engrs.* – 1956. – 44. – July. – P. 920–926.
12. Абрахамс, Дж. Анализ электрических цепей методом графов / Дж. Абрахамс, Дж. Каверли. – М.: Мир, 1967. – 175 с.
13. Пятибратов, Г.Я. Принципы построения и реализации систем управления усилиями в упругих передачах электромеханических комплексов / Г.Я. Пятибратов // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 1998. – № 5–6. – С. 73–83.
14. Левинтов, С.Д. Система ограничения динамических нагрузок в механизме напора экскаватора / С.Д. Левинтов, А.М. Борисов, Г.Я. Пятибратов // *Электротехническая промышленность. Сер. Электропривод: науч.-техн. реф. сб. / Информэлектро.* – М., 1980. – № 7 (87). – С. 18–20.
15. Пятибратов, Г.Я. Ограничение динамических нагрузок в механизме напора карьерного экскаватора ЭКГ-4,6Б / Г. Я. Пятибратов, С.Д. Левинтов, А.М. Борисов // *Изв. вузов. Горный журнал.* – 1980. – № 10. – С. 92–95.
16. Пятибратов, Г.Я. Повышение эффективности применения быстродействующих электроприводов копающих механизмов карьерных экскаваторов / Г. Я. Пятибратов, А.М. Борисов // *Известия Тульского государственного университета. Сер. Технические науки.* – Тула, 2010. – Вып. 3, ч. 3. – С. 138–144.
17. Пятибратов, Г.Я. Активное демпфирование электроприводом упругих колебаний исполнительных механизмов сбалансированных манипуляторов / Г.Я. Пятибратов, И.В. Хасамбиев // *Изв. вузов. Электромеханика.* – 2007. – № 4. – С. 55–61.

Пятибратов Георгий Яковлевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматика», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия; g.pyatibratov@mail.ru

Поступила в редакцию 27 июня 2015 г.

DOI: 10.14529/power150309

SPECIFICATION OF CONDITIONS TO MINIMISE ELECTRIC DRIVE LOADS AT ACTIVE LIMITATION OF DYNAMIC FORCES OF SPRINGY MACHINERY

G. Ya. Pyatibratov, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation, g.pyatibratov@mail.ru

Active ways of oscillations damping and dynamic loads limiting of machinery springy gears were studied that are implemented by additional control impacts made by the electric drive. The study is aimed to detect the conditions required to minimise the electric drive energy costs while applying active ways of dynamic loads limiting of the machinery springy gears.

We got analytic equations to calculate irreducible values of engine torque (current) and EMF of the converter supplied it that is required for determined decrease of machinery dynamic efforts. We specified the conditions of engine torque minimisation and EMF of the converter supplied it while applying active ways of dynamic loads limiting of the machinery springy gears.

We detected that in order to assure effective application of the active ways the channel of machinery dynamic forces limiting shall provide changing of the torque component from the additional control impact in the opposite phase with force in the mechanical gear springy element and it helps to minimize the electric drive energy costs.

We introduce the implementation examples of the active ways of machinery dynamic limiting operating in real industrial environments.

Keywords: electric drive, springy gear, machinery force limiting.

References

1. Kozhevnikov S.N. *Dinamika mashin s uprugimi zven'yami* [Machines Dynamics with Springy Links]. Kiev, AN USSR, 1961. 159 p.
2. Klyuchev V.I. *Ogranichenie dinamicheskikh nagruzok elektroprivodov* [Dynamic Force Limiting of Electric Drives]. Moskov, Mashinostroenie Publ., 1971. 383 p.
3. Pyatibratov G.Ya. [The Efficiency of Parametric Methods of Machinery Springy Oscillations Damping]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 2013, no. 2, pp. 29–33. (in Russ)
4. Pyatibratov G.Ya. [Breaking Performances of Electric Driver While Machinery Springy Oscillations Damping]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 2014, no. 4, pp. 63–68. (in Russ)
5. Levintov S.D., Pyatibratov G.Ya. [Concerning Electric Drive Application for Dynamic Loads Limiting in Transmissions]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 1978, no. 10, pp. 1096–1102. (in Russ)
6. Pyatibratov G.Ya. [Concerning Electric Drive Application for Dynamic Loads Limiting in Transmissions]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 1986, no. 6, pp. 72–82. (in Russ.)
7. Pyatibratov G.Ya. [Electric Drives Applicability for Cushion Mechanical Drives Vibrations Active Constraint]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 1990, no. 10, pp. 89–93. (in Russ.)
8. Pyatibratov G.Ya. [Construction of Electric Drive Control Systems Allowing Dynamic Loads Limiting in Mechanical Transmissions of Vorking Machinery]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 1979, no. 8, pp. 709–713. (in Russ.)
9. Pyatibratov G.Ya., Levintov S.D. [Concerning Electric Drive Loads Limiting Dynamic Torques in Machinery Springy Elements]. *Issledovanie avtomatizirovannykh elektroprivodov, elektricheskikh mashin i ventil'nykh preobrazovatelye*. Chelyabinsk, Chelyabinsk. politekhn. in-t, 1977, iss. 196, pp. 146–150. (in Russ.)
10. Skuchik E. *Prostye i slozhnye kolebatel'nye sistemy* [Simple and Complex Oscillatory Systems]. Moskov, Mir, 1971. 557 p.
11. Mason S.I. [Feedback Theory Further Properties of Signal Flow Graphs]. *Proc. Inst. Radio Engrs*, 1956, 44, July, pp. 920–926.
12. Abrakhams Dzh., Kaverli Dzh. *Analiz elektricheskikh tsepey metodom grafov* [Electrical Circuits Analyses by Method of Graphs]. Moskov, Mir, 1967. 175 p.
13. Pyatibratov G.Ya. [The Design Principles and Force Control Systems Implementation in Cushion Drives of Electromechanical Complexes]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Elektromechanics], 1998, no. 5–6, pp. 73–83. (in Russ.)
14. Levintov S.D., Borisov A.M., Pyatibratov G.Ya. [Dynamic Loads Limiting Systems in Excavator Trust Mechanizm]. *Elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. Ser. Elektroprivod: Nauch.-tekhn. ref. sb.* Moskov, Informelektro, 1980, no. 7 (87), pp. 18–20. (in Russ.)
15. Pyatibratov G.Ya. [Dynamic Loads Limiting in Mine Excavator trust Mechanism EKG-4,6B]. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 1980, no. 10, pp. 92–95. (in Russ.)
16. Pyatibratov G.Ya., Borisov A.M. [Mine Excavators Digging Mechanisms High-Speed Electric Drives Application Efficiency Upgrading]. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser. Tekhnicheskie Nauki* [News of the Tula State University. Technical science Series]. Tula, 2010, no. 3, pp. 138–144. (in Russ.)
17. Pyatibratov G.Ya., Khasambiev I.V. [Damping of Elastic Vibrations of Electric Actuators Balanced Manipulators]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanik* [Elektromechanics], 2007, no. 4, pp. 55 – 61. (in Russ.)

Received 27 June 2015

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Пятибратов, Г.Я. Определение условий минимизации нагрузок электропривода при активном ограничении динамических усилий упругих механизмов / Г.Я. Пятибратов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 66–73. DOI: 10.14529/power150309

FOR CITATION

Pyatibratov G.Ya. Specification of Conditions to Minimise Electric Drive Loads at Active Limitation of Dynamic Forces of Springy Machinery. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 66–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/power150309