

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРЕДЕЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С УПРУГИМИ СВЯЗЯМИ

Совершенствование динамических качеств современных регулируемых электроприводов технологических машин в значительной степени зависит от существенности влияния на динамику упругих механических звеньев. Отрицательное влияние упругих звеньев проявляется в росте динамических нагрузок на двигатель и механизм и отклонении переходных процессов от предписанных технологией производства.

Электромеханическая связь при определенных сочетаниях параметров механической и электромагнитной подсистем привода вызывает эффект демпфирования упругих механических колебаний [1]. Следовательно, оптимизацией структуры и параметров электропривода можно практически решить задачу ограничения уровня и времени действия динамических нагрузок двигателя и механизма. Реализовать демпфирующие свойства электропривода возможно при проработке проектных решений путем выбора его параметров или настройкой регуляторов по методам, которые не требуют специального оборудования и отличаются незначительными затратами [2].

Детальный анализ и обобщение результатов опубликованных за последние два десятилетия научно-исследовательских работ по синтезу систем электроприводов с упругими механическими звеньями показывает, что объективно оформились и развиваются в настоящее время два направления улучшения качества процессов управления и регулирования:

1. синтез параметров и структур электромеханических систем (ЭМС) с целью минимизации реакции электропривода на действие колебаний упругого момента как внешнего (гармонического) возмущения по нагрузке на валу электродвигателя;

2. решение задач синтеза ЭМС с минимальной колебательностью с целью использования демпфирующего эффекта электропривода при взаимодействии колебаний упругой механической и электромагнитной подсистем.

Традиционные методы решения задач указанных направлений предполагают выбор параметров (структуры) на основании задания динамических свойств электромеханической системы, как целого. Такой подход заранее регламентирует вид динамических характеристик составных частей (подсистем) и, в результате синтеза системы эффекты взаимодействия и характер связи подсистем намеренно исключены из продуктивных вариантов оптимизации. Выбор оптимальных параметров электропривода по рекомендациям работ [1] отвечает физической природе демпфирующего действия электромеханической связи, и минимум колебательности в системе возможно реализовать за счет определенного сочетания параметров динамической жесткости механической характеристики электропривода. Косвенная оценка демпфирующего действия при синтезе производится по коэффициенту электромеханической связи $K_{ЭС}$ [3] при условии его близости к единице. Оценка является неоднозначной и условие не является достаточным и требует, как указывается в [4], проверки на достижение максимума демпфирующей способности электропривода.

Практически представительным и содержательным по учету факторов является метод синтеза параметров ЭМС на основе принципа электромеханической совместимости [5]. Формирование оптимальных показателей колебательности полной системы осуществляется в зависимости от свойств отдельных подсистем и вида связи между ними. Соотношения взаимосвязи параметров получены в результате разделения (динамической декомпозиции) системы и синтеза с компенсацией преобладающего типа (вида) связи составных (отдельных) подсистем.

В данной работе на основании метода синтеза [5] производится оптимизация динамики ЭМС применительно к электроприводам постоянного и переменного тока с линейной (линеаризованной) механической характеристикой при эквивалентировании механической подсистемы двухмассовой расчетной схемой без учета потерь на внутреннее и внешнее трение. Структурная схема ЭМС для обобщенной формы записи и обозначения параметров приведена на рис. 1.

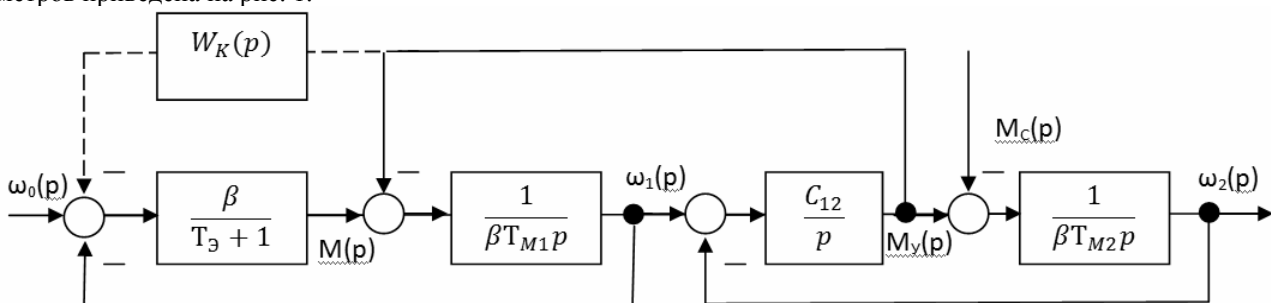


Рис. 1. Структурная схема электропривода с линейной механической характеристикой

Анализ процессов демпфирования упругих колебаний при активном влиянии первой массы производится на основании общей и прямой оценки колебательности – логарифмическому декременту λ . Тогда для исследования затухания достаточно рассмотреть характеристическое уравнение [4], которое для структурной схемы без учета корректирующего звена $W_k(p)$ (показано подключение пунктиром) имеет следующий вид:

$$Q(p) = \gamma T_{M1} T_{\Delta}^2 T_y^2 p^4 + \gamma T_{M1} T_y^2 p^3 + \gamma (T_{M1} T_{\Delta} + T_y^2) p^2 + \gamma T_{M1} p = 0. \quad (1)$$

Для исследования закономерностей демпфирования упругих колебаний и анализе зависимости свойств полной ЭМС от динамических характеристик отдельных (парциальных) подсистем используется оригинальная форма нормирования – обобщенные показатели электромеханического взаимодействия [6]. Обобщенные показатели в относительных единицах характеризуют степень электромеханического взаимодействия, имеют физический смысл, математически описывают связь динамических инвариант подсистем, просто выражаются через частные конкретные значения параметров той или иной структурной схемы и представляются в виде:

$$K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{\Delta}^2} = \frac{T_{M1} T_{\Delta}}{T_y^2}; \quad (2)$$

$$\xi_D = \alpha_{\Delta} / \sqrt{\alpha_{\Delta}^2 + \Omega_{\Delta}^2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{T_{\Delta}}}; \quad (3)$$

$$\gamma = (J_1 + J_2) / J_1 = (T_{M1} + T_{M2}) / T_{M1}. \quad (4)$$

Совместное рассмотрение (2) и (3) позволяет получить соотношения взаимосвязи параметров парциальных электромагнитной и механической подсистем, составляющих полную ЭМС:

$$T_{\Delta} = \frac{\sqrt{K_B}}{2\xi_D} T_y; \quad (5)$$

$$T_{M1} = 2\sqrt{K_B} \xi_D T_y. \quad (6)$$

Характеристическое уравнение (1) при использовании соотношений (5), (6) преобразуется в эталонное нормированное уравнение следующего вида:

$$Q(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \sqrt{K_B} \xi_D T_y^3 p^3 + \gamma(1 + K_B) T_y^2 p^2 + 2\sqrt{K_B} \xi_D T_y p + 1 = 0, \quad (7)$$

где K_B – коэффициент электромеханического взаимодействия; ξ_D – коэффициент демпфирования (активного) электромагнитной подсистемы, в разомкнутой системе – собственно электродвигателя; γ – коэффициент распределения инерционных масс двигателя и механизма; $T_y = 1/\Omega_{12}$ – постоянная времени упругих колебаний; Ω_{12} – частота свободных колебаний механической подсистемы.

Требуемые динамические характеристики ЭМС определяются комплектацией корней в зависимости от значений обобщенных параметров K_B , ξ_D , γ и реализуются при выборе параметров по соотношениям (5), (6). Оптимизация ЭМС по заданному критерию требует обеспечения соответствующих динамических свойств (характеристик) отдельных подсистем, что следует из формализации взаимосвязи (2), (3), (4). Тогда характеристическое уравнение (7) будет иметь и адекватную свойствам взаимосвязанных подсистем форму представления.

Минимум колебательности (максимум демпфирования) системы достигается при полной тождественности подсистем и идентичности процессов, характеристическое уравнение (7) однозначно представляется уравнением вида:

$$Q_1(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_D T_y p + 1)(T_y^2 p^2 + 2\xi_D T_y p + 1) = 0, \quad (8)$$

где ξ – коэффициент демпфирования упругих колебаний ЭМС для представления (8), $\xi < 1.0$ и корни $Q_1(p)$ являются кратными комплексно-сопряженными.

Предельный случай достижения максимума демпфирующего действия электропривода (8) определен областью допустимых значений $1.0 < \gamma < 5.0$ и реализуется при колебательном характере процессов в электромагнитной подсистеме [6] при соблюдении условий:

$$K_B = K_{BOPT1} = 1/\gamma; \quad (9)$$

$$\xi_D = \xi_{DOPT1} = \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}; \quad (10)$$

$$\gamma > 1.0. \quad (11)$$

Физически этот специфический случай (8) означает, что в динамике при соблюдении (9) силы упругой связи системы скомпенсированы силами инерционной связи. Следовательно, при реализации оптимальных параметров ЭМС (5), (6) в динамике процессы для координат M , ω будут эквивалентированы процессами в системе без проявления эффекта двухмассовости и имеют минимальную колебательность:

$$\mu_{OPT1} = \left| \frac{\Omega}{\alpha} \right| = \mu_{\min} = \sqrt{\frac{5-\gamma}{\gamma-1}}, \quad (12)$$

логарифмический декремент достигает максимума для данного значения γ :

$$\lambda_{ОПТ1} = 2\pi \left| \frac{\alpha}{\Omega} \right| = \lambda_{\max} = 2\pi \sqrt{\frac{\gamma-1}{5-\gamma}}. \quad (13)$$

Коэффициент демпфирования процессов в ЭМС для оптимального случая (8) принимает значение:

$$\xi = \xi_{ОПТ1} = \sqrt{\gamma-1}/2 \quad (14)$$

при частоте упругих колебаний:

$$\Omega = \Omega_{ОПТ} = 1/T_y = \Omega_{12}. \quad (15)$$

В реальных условиях параметры ЭМС под действием окружающей среды и наличия нелинейных характеристик, из-за влияния специфических режимов могут изменяться (т.е. являются нестабильными). Система автоматического управления с электропривода с расположением корней характеристического уравнения (8) чувствительна к нестабильности параметров и без принятия специальных мер условия оптимальности (9), (10) могут нарушаться. Обеспечить максимум демпфирующего действия электропривода и стабильность динамических характеристик возможно при синтезе параметров ЭМС по условиям пропорциональности комплексно-сопряженных корней характеристического уравнения. Максимум демпфирования (минимум колебательности) в системе для локального экстремума достигается с представлением характеристического уравнения (7) в виде разложения:

$$Q_2(p) = (T_0^2 p^2 + 2\xi_0 T_0 p + 1)(\varepsilon^2 T_0^2 p^2 + 2\xi_0 \varepsilon T_0 p + 1) = 0, \quad (16)$$

где ε - коэффициент пропорциональности действительной и мнимой частей корней характеристического уравнения, ξ_0 - коэффициент демпфирования упругих колебаний в системе для расположения корней уравнен. (16).

Представить характеристическое уравнение (7) в виде (16) можно при соблюдении следующих условий [7]:

$$K_B = K_{ВОПТ2} = 1/\gamma; \quad (17)$$

$$\xi_D = \xi_{ДОПТ2} = \frac{\varepsilon+1}{2\varepsilon} \sqrt{\frac{\varepsilon(\gamma-\varepsilon)+(\varepsilon-1)}{\gamma}}; \quad (18)$$

$$\gamma \geq \frac{(\varepsilon+1)^2 - 3\varepsilon}{\varepsilon}, \quad 0 < \varepsilon < 1.0. \quad (19)$$

Для локального экстремума при учете условий (17), (18) в ЭМС достигается экстремум – максимум демпфирующего действия электропривода с логарифмическим декрементом затухания:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{\varepsilon(\gamma-\varepsilon)+(\varepsilon-1)}{4\varepsilon-\varepsilon(\gamma-\varepsilon)-(\varepsilon-1)}} \quad (20)$$

при соблюдении ограничений для коэффициента распределения инерционных масс γ (19). Если принять $\varepsilon = 1.0$, то условие (17), (18), (19) в точности совпадают с условиями достижения предельной степени демпфирующего действия (9), (10).

В результате оптимизации электромеханической связи и относительного коэффициента демпфирования активного гасителя колебаний по условиям (9), (10) и (17), (18) демпфирование упругих колебаний полной ЭМС осуществляется при относительном росте колебательной составляющей тока электродвигателя. Для широкого класса электроприводов металлургического и машиностроительного производства это не всегда приемлемо по условиям загрузки двигателя. Тогда предельное (максимальное) значение демпфирующего действия электропривода можно «перераспределить» в допустимых (ограниченных) пределах электромагнитной и механической подсистем [8].

При оптимальном электромеханическом взаимодействии ($K_B = 1/\gamma$) в ЭМС возможна такая комплектация корней, когда огибающая колебательных процессов в электромагнитной и механической подсистемах будет различной. Характеристическое уравнение (7) в таком случае представляется алгебраически в виде:

$$Q_3(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_\Sigma T_y p + 1)(T_y^2 p^2 + 2\xi_M T_y p + 1) = 0, \quad (21)$$

где $\xi_M = \alpha \xi_\Sigma$, $0 < \alpha \leq 1.0$ – коэффициент веса, вносимого электроприводом демпфирования при условии $\xi_\Sigma < 1.0$.

Параметры электромагнитной подсистемы (5), (6) выбирают для оптимального:

$$K_{ВОПЗ} = 1/\gamma, \quad (22)$$

коэффициент демпфирования электромеханического преобразователя:

$$\xi_D = \xi_{ДОПТ3} = \frac{\alpha+1}{2\sqrt{\alpha}} \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{\alpha+1}{2\sqrt{\alpha}} \xi_{ДОПТ1}. \quad (23)$$

ЭМС при выборе параметров по условиям (22), (23) будет иметь в зависимости от коэффициента веса α колебательность:

$$\mu = \mu_{ОПТ3} = \sqrt{\frac{4-\alpha(\gamma-1)}{\alpha(\gamma-1)}}, \quad (24)$$

логарифмический декремент затухания для процессов в ЭМС с регламентацией (перераспределением) демпфирующего действия электропривода определяется расположением корней характеристического уравнения (21) с меньшим значением λ :

$$\lambda = \lambda_{\text{ОПТЗ}} = 2\pi \frac{\alpha}{\Omega} = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha(\gamma-1)}{4-\alpha(\gamma-1)}}. \quad (25)$$

При $\alpha = 1.0$ условия (22), (23) соответствуют условиям предельной степени демпфирования упругих колебаний. Таким образом, задавая оптимальное расположение корней характеристического уравнения полной ЭМС и, соответственно, форму его представления, определяемую обобщенными показателями электромеханического взаимодействия K_B , ξ_d , γ на основании соотношений взаимосвязи (5), (6) рассчитывают оптимальные параметры – постоянные времени – $T_Э$, T_{M1} электромагнитной подсистемы.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов при сравнении с переходными процессами предельного демпфирования (сплошная линия) в ЭМС для единичного ступенчатого управляющего воздействия при выполнении оптимизации по критерию минимум колебательности для предельной степени демпфирования и локального (частного) экстремума. Графики получены моделированием на ЭВМ процессов в ЭМС с параметрами $\gamma = 1.5$, $\Omega_{12} = 62.8 \text{ с}^{-1}$, $\varepsilon = 0.588$.

Фактические значения параметров ЭМС, как правило, отличаются от оптимальных, и практически их корректируют с помощью организации регуляторов и цепей обратных связей по координатам первой и второй массы. На рис. 1 пунктирной линией показан возможный вариант коррекции ЭМС по координатам второй массы.

Предложенный метод позволяет синтезировать параметры ЭМС, свойства которой можно сформировать в зависимости от динамических свойств отдельных подсистем. При реализации предельного демпфирования в ЭМС силы упругой связи компенсируются силами инерционной, и система в динамике становится эквивалентной одномассовой. В ЭМС возможно также реализовать локальный экстремум демпфирующего действия электропривода по условиям пропорциональности комплексно-сопряженным корням. При оптимальной электромеханической связи в ЭМС возможно также регламентировать демпфирующее действие электропривода с целью перераспределения колебательности подсистем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.И. Анализ электромеханической связи при упругих колебаниях в электроприводе / В.И. Ключев // *Электричество*. – 1971. – № 9. – С. 47–51.
2. Задорожная И.Н. Способы снижения динамических нагрузок в главных линиях приводов непрерывных прокатных станков / И.Н. Задорожная // *Вісник Криворізького технічного університету*. – Кривий Ріг: КТУ. – 2007. – Вип. 18. – С. 141 – 144.
3. Ключев В.И. Оптимизация электропривода с упругой связью по критерию минимума колебательности в переходных процессах / В.И. Ключев, Л.Я. Теличко // *Электричество*. – 1977. – № 1. – С.38–43.
4. Чиликин М.Г. Теория автоматизированного электропривода : учеб. пособие [для вузов] / Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С.– М.: Энергия, 1979. – 616 с.
5. Задорожный Н.А. Принцип электромеханической совместимости в приводах машин с упругими механическими связями / Задорожный Н.А. // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 1999. – Вип. 61. – С. 123 – 124.
6. Земляков В. О демпфировании электроприводом постоянного тока упругих электромеханических колебаний / Владимир Земляков, Николай Задорожный // *Изв. вузов. Электромеханика*. – 1984. – № 5. – С. 92–98.
7. Задорожный Н.А. Оптимизация процессов преобразования энергии электромеханического взаимодействия в электроприводах с упругими связями / Задорожный Н.А., Задорожная И.Н. // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика» науково-технічного журналу «Екоінформ». – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 80-81.
8. Особенности реализации принципа электромеханической совместимости для технически оптимальных систем / Н.А. Задорожный, В.В. Зеновский, И.Н. Задорожная // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: «ХПІ» – 2000. – Вип. 113. – С. 129 – 130.

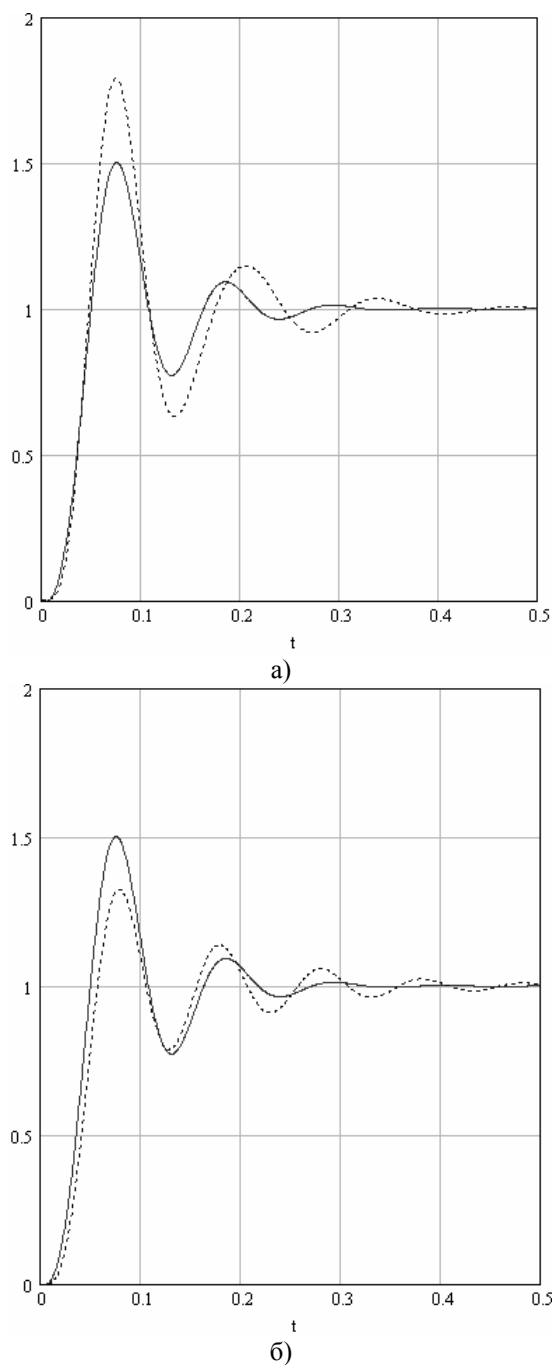


Рис. 2. Переходные процессы для режима ступенчатого управляющего воздействия:
а – пропорциональные корни;
б – регламентация демпфирующего действия