

ОЦЕНКА СТАТИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ПРЕДЕЛЬНОМ ДЕМПФИРОВАНИИ УПРУГИХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Одним из важных свойств электропривода является его способность демпфировать упругие механические колебания в переходных режимах и периодических возмущениях [1]. Оптимизацией электромеханической связи добиваются усиления демпфирования упругих колебаний и существенного снижения уровня динамических нагрузок и времени их действия на электрическое и механическое оборудование. Влиять на колебательность процессов возможно путем выбора соответствующей динамической жесткости механической характеристики электропривода [2], а также формированием процессов электромеханического взаимодействия с компенсацией действия упругих сил инерционными [3]. Стабильность механической характеристики электропривода является фактором обратного влияния колебаний механизма на угловую скорость вращения электродвигателя и показателем точности регулирования скорости.

Если при проектировании электроприводов исходить только из условий задания точности регулирования скорости без учета влияния упругих механических связей на показатели переходных процессов, то характер и уровень динамических нагрузок не может гарантировать надежного функционирования электрооборудования, необходимых резервов прочности механического оборудования и, соответственно, его сроков службы [4]. Поэтому, при использовании на практике динамических возможностей современного электропривода возникает задача оценки статической точности регулирования скорости при обеспечении активного демпфирования упругих механических колебаний. Оценка статической точности регулирования производится по статическому падению скорости электропривода при набросе номинальной нагрузки для случая выбора параметров с предельной степенью демпфирования упругих механических колебаний.

На рис. 1 приведена структурная схема электропривода с обратной связью по скорости двигателя постоянного тока при представлении механической части двухмассовой расчетной схемой с упругим звеном и отсутствии диссипативных факторов.

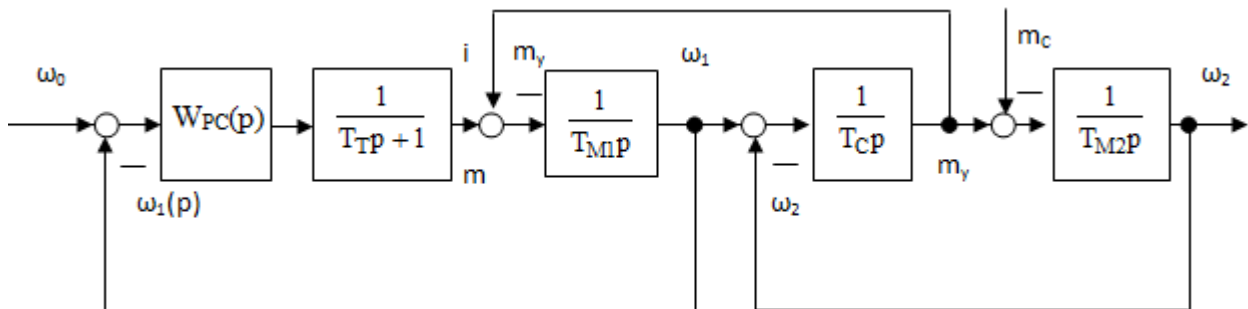


Рис. 1 Структурная схема электропривода с обратной связью по скорости электродвигателя

Электромагнитная часть электропривода описана инерционным динамическим звеном, постоянные времени и коэффициенты исходной структурной схемы имеют общепринятые обозначения в относительной форме параметров. Для линеаризованной механической характеристики структурная схема справедлива и для электропривода переменного тока с асинхронным двигателем при скалярном управлении для режима малых отклонений регулируемых координат [4]. Демпфирующее действие электропривода определяется на основании анализа расположения корней характеристического уравнения электромеханической системы (ЭМС). Характеристическое уравнение ЭМС, приведенной на структурной схеме рисунка 1, имеет следующий вид:

$$Q(p) = \gamma T_{M1} T_T T_y^2 p^4 + \gamma T_{M1} T_y^2 p^3 + \gamma (T_{M1} T_T + K_{PC} T_y^2) p^2 + \gamma T_{M1} p + K_{PC} = 0, \quad (1)$$

где $\gamma = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1}$ – коэффициент распределения инерционных масс двигателя и механизма; $T_y = 1/\Omega_{12}$; Ω_{12} – частота свободных колебаний двухмассовой механической подсистемы; $T_c = 1/c$; $c = C_{12}\omega_0/M_H$ – относительное значение коэффициента упругости механической передачи; T_T – постоянная времени электромагнитной подсистемы привода; K_{PC} – коэффициент усиления регулятора скорости.

Обобщенный анализ демпфирующих свойств электропривода упрощается при использовании формы нормирования [5] с показателями электромеханического взаимодействия процессов подсистем:

$$K_B = \frac{\Omega_{12}^2}{\Omega_{\Sigma}^2} = \frac{T_{M1} T_T}{K_{PC} T_y^2}; \quad \xi_d = \frac{\alpha_{\Sigma}}{\sqrt{\alpha_{\Sigma}^2 + \beta_{\Sigma}^2}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_{M1}}{K_{PC} T_T}}, \quad (2)$$

где K_B – коэффициент электромеханического взаимодействия; ξ_d – коэффициент затухания электромагнитной подсистемы (ЭП).

Предельное значение демпфирующего действия электропривода с полной компенсацией действия упругих сил силами инерционными достигается при условии, что

$$K_B = \frac{1}{\gamma}; \quad \xi_D = \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma}}. \quad (3)$$

Характеристическое уравнение (1), приведенное с помощью обобщенных показателей (2) к нормированному виду (4), которое при выполнении условий (3) эквивалентно эталонному (5)

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

$$Q_{\Sigma}(p) = (T_y^2 p^2 + 2\xi_0 T_y p + 1) \times (T_y^2 p^2 + 2\xi_0 T_y p + 1) = 0. \quad (5)$$

Процессы в ЭМС будут иметь минимальную колебательность с коэффициентом затухания (6) и частотой демпфированных колебаний (7)

$$\xi_{\Sigma} = \xi_M = \xi_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\gamma-1}, \quad (6)$$

$$\Omega_{\Sigma} = \Omega_{МП} = \Omega_0 = \frac{1}{2T_y} \sqrt{5-\gamma}. \quad (7)$$

Оптимальные по критерию затухания колебаний процессы в ЭМС обеспечиваются соответствующим выбором параметров структурной схемы. Если перейти обратно от обобщенных показателей к параметрам настройки системы автоматического регулирования, то они определяются следующими соотношениями

$$K_{PC} = \frac{\gamma T_{M1}}{2\sqrt{\gamma-1} T_y}; \quad (8)$$

$$T_T = \frac{T_y}{2\sqrt{\gamma-1}}. \quad (9)$$

Для оценки величин статического падения скорости электропривода с оптимальными параметрами (8), (9) и реальными значениями γ , T_y воспользуемся уравнением механической характеристики $\omega = f(m)$. Из структурной схемы для установившегося режима получаем зависимость

$$\omega_2 = \omega_1 = \omega_0 - m \frac{1}{K_{PC}}, \quad (10)$$

так как в статическом режиме движения электропривода $m = m_C$, то

$$\omega = \omega_0 - m_C \frac{1}{K_{PC}}. \quad (11)$$

При единичном ступенчатом возмущающем воздействии ($m_C = 1.0$) статическое падение скорости в относительных единицах

$$\Delta\omega_C = \omega_0 - \omega = \frac{1}{K_{PC}}. \quad (12)$$

При подстановке в выражение (12) коэффициента регулятора скорости из соотношения (8) получаем окончательно формулу для определения величины статического падения скорости электропривода с предельной степенью демпфирования упругих колебаний

$$\Delta\omega_C = \frac{2\sqrt{\gamma-1}}{\gamma} \cdot \frac{1}{\tau}, \quad (13)$$

где $\tau = T_{M1}/T_y = T_{M1}\Omega_{12}$ – отношение постоянных времени.

Предельная степень демпфирования упругих колебаний в электроприводе требует соблюдения оптимальных соотношений параметров, что также определяет и условия физической реализуемости настроек регуляторов системы автоматического регулирования. С этой целью был проведен анализ возможных величин постоянных времени T_T , коэффициентов усиления регулятора скорости и статического падения скорости электропривода в диапазоне $1.0 < \gamma \leq 5.0$ при различных значениях τ .

В результате расчетов установлено, что для электропривода с коэффициентами распределения инерционных масс $1.5 < \gamma \leq 3.0$ отношение $2\sqrt{\gamma-1}/\gamma$ интерполируется величиной, близкой к единице, и система регулирования скорости обеспечивает в предельном случае демпфирования упругих колебаний неизменную величину статического падения $\Delta\omega_C$ для каждого конкретного τ .

В таблице 1 приводятся расчетные соотношения и выделена область параметров систем автоматического регулирования с отмеченными свойствами (примечание: $\tau = T_{M1}\Omega_{12} = 20$). Также для графической иллюстрации на рис. 2 приведены графики зависимости статического падения скорости электропривода от коэффициента распределения инерционных масс γ для случая, когда электромеханическая постоянная времени $T_{M1} = 0,15924$ с для частоты $1 - \Omega_{12} = 75 \text{ с}^{-1}$, $2 - \Omega_{12} = 100 \text{ с}^{-1}$, $3 - \Omega_{12} = 200 \text{ с}^{-1}$.

Таблица 1 – Соотношения оптимальных параметров системы управления

Параметры ЭМС				
γ	T_T	$2\sqrt{\gamma-1}/\gamma$	K_{PC}	$\Delta\omega_c$
1.36	0.0113	1.13	22.6	0.044
1.49	0.0114	1.064	21.28	0.047
1.5	0.0113	1.06	21.2	0.0471
1.64	0.01	1.025	20.5	0.0487
1.81	0.0089	1.0055	20.11	0.0497
2.0	0.008	1.0	20.0	0.05
2.21	0.00727	1.0045	20.09	0.0497
2.44	0.00667	1.0166	20.33	0.049
2.69	0.00615	1.034	20.68	0.0485
2.96	0.00571	1.057	21.14	0.0475
3.0	0.00565	1.0606	21.12	0.0473
3.25	0.00533	1.083	21.66	0.046
3.56	0.005	1.11	22.2	0.045
3.89	0.0047	1.14	22.8	0.0438

Статическая точность электромеханической системы в диапазоне $1.5 < \gamma \leq 3.0$ при настройке регуляторов на предельную степень демпфирования упругих колебаний практически является величиной постоянной.

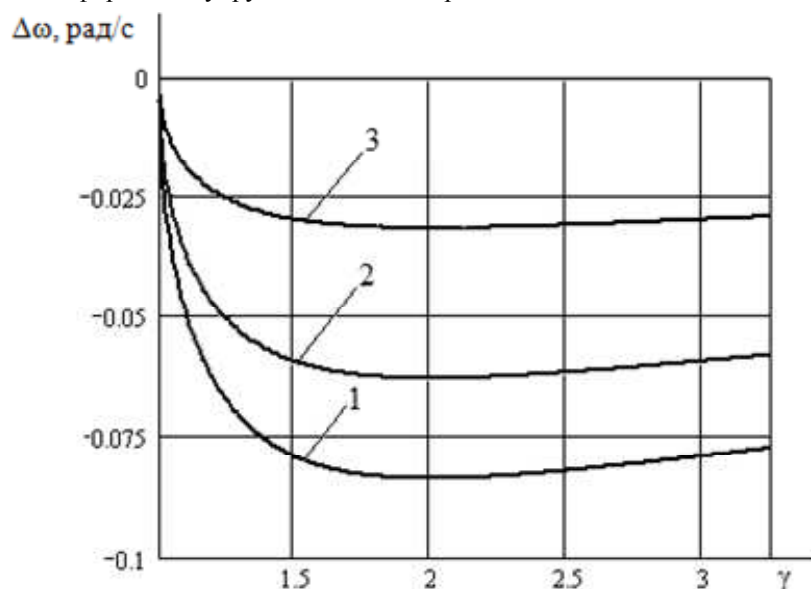


Рис. 2 Графики зависимости падения скорости от коэффициента распределения инерционных масс

На основании проведенных исследований показано, что при реализации предельной степени демпфирующего действия электропривода обеспечиваются и высокая точность регулирования. Статическое падение скорости в диапазоне $1.5 < \gamma \leq 3.0$ для определенных значений отношения постоянных $\tau = T_{MI}/T_y$ являются величиной постоянной. Таким образом, оптимизация электропривода по критерию затухания упругих колебаний с реализацией предельного демпфирования позволяет обеспечить и требуемые статические показатели. Результаты расчетов были проверены путем математического моделирования в среде Simulink пакета Matlab, а также экспериментально в лабораторных условиях.

Литература

1. Ключев В. И. Анализ электромеханической связи при упругих колебаниях в электроприводе / В. И. Ключев // Электричество. – 1971. – № 9. – С. 47–51.
2. Ключев В.И., Жильцов Л.В., Калашников Ю.П. Состояние и перспективы развития теории электропривода с упругими механическими связями // Электричество. – 1981. – №7. – С. 29-32.
3. Земляков В.Д., Задорожний Н.А. О демпфировании электроприводом упругих электромеханических колебаний // Изв. вузов. Электромеханика. – 1985. – С. 99-92.
4. Ключев В. И. Теория электропривода / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 616 с.
5. Задорожний Н.А., Задорожня И.Н. Оптимизация процессов преобразования энергии электро-механического взаимодействия в электроприводах с упругими связями // Тематический выпуск «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» научно-технического журнала «Электроинформ». – Львов: Экоинформ, 2009. – С 80-81.