

УДК 621.5:62-83

Пересада С. М., Онанко А. Ю.

СПЕЦИФИКАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В СИСТЕМАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ПАССИВНОСТИ

В электромеханических системах, основанных на принципе пассивности, за счет управления формируется декомпозиция исходной модели электрической машины на две связанные подсистемы: электрическую (ЭПС) и механическую (МПС) [1–3]. При этом для основных типов электрических машин (асинхронного двигателя, синхронного двигателя, двигателя постоянного тока, машины двойного питания) вектор управляющих напряжений синтезируется таким, чтобы гарантировать ЭПС свойство глобальной (локальной) асимптотической экспоненциальной устойчивости.

Принципиальной особенностью такого управления является то, что после затухания в ноль ошибок отработки в ЭПС достигается асимптотическая линеаризация МПС, в то время как ЭПС находится в положении равновесия независимо от процессов управления в механической подсистеме, то есть МПС и ЭПС асимптотически развязаны. Управление механическими координатами в такой системе не зависит от типа двигателя, поэтому представляется возможным спроектировать унифицированный регулятор скорости, приводящий к одинаковым показателям качества для разных типов электрических машин [2]. Формируемая при этом структура системы регулирования скорости сходна с типовой структурой контура регулирования скорости при подчиненном регулировании параметров [4], для задания динамических показателей качества в котором традиционно используют нормированные переходные функции.

Целью данной работы является конструирование унифицированного регулятора скорости и исследование (с помощью нормированных переходных характеристик) динамических показателей качества системы регулирования скорости при управлении по принципу пассивности.

Унифицированный алгоритм отработки угловой скорости

Пусть ω^* – заданная траектория изменения угловой скорости, ограниченная функция с известными ограниченными первой и второй производными по времени. Внешний момент нагрузки M_c – неизвестный, ограниченный и постоянный (медленно изменяется относительно изменений угловой скорости), так что $\dot{M}_c = 0$.

С учетом этих допущений необходимо спроектировать и исследовать алгоритм управления угловой скоростью, который гарантирует:

1. Асимптотическую отработку заданных траекторий угловой скорости, то есть $\lim_{x \rightarrow \infty} \tilde{\omega} = 0$, где ошибка отработки угловой скорости определена как $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$.
2. Линейную номинальную динамику МПС (когда ЭПС находится в состоянии равновесия) со свободно задаваемыми показателями качества. Рассмотрим уравнение движения механической части произвольной электрической машины:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J}(M - M_c), \quad (1)$$

где M – момент развиваемый двигателем;
 J – момент инерции.

Динамическое поведение ошибки обработки угловой скорости запишется в виде:

$$\dot{\tilde{\omega}} = \frac{1}{J} M^* + \frac{1}{J} \tilde{M} - \tilde{M}_c - \hat{M}_c - \dot{\omega}^*, \quad (2)$$

где M^* – задание момента, $\tilde{M} = M - M^*$ – ошибка обработки момента, обусловленная ошибками обработки в ЭПС;

\hat{M}_c – оценка константы $\frac{M_c}{J}$, так что ошибка оценивания равна $\tilde{M}_c = \frac{M_c}{J} - \hat{M}_c$.

Для типовой структуры (2) сконструируем унифицированный регулятор угловой скорости:

$$\begin{aligned} M^* &= J(\hat{M}_c + \dot{\omega}^* + k_\omega \eta) \\ \dot{\tilde{M}}_c &= -\dot{\tilde{M}}_c = k_{oi} \eta \\ \dot{\eta} &= -\frac{1}{\tau} \eta - \frac{1}{\tau} \tilde{\omega}, \end{aligned} \quad (3)$$

где η – фильтрованная ошибка обработки угловой скорости;

τ – постоянная времени линейного фильтра скорости;

$(k_\omega, k_{oi}) > 0$ – коэффициенты пропорциональной и интегральной составляющих регулятора скорости.

Необходимо отметить, что введение фильтра с постоянной времени τ необходимо для того, чтобы первая производная по времени от заданного момента M^* была известной функцией согласно процедуре синтеза алгоритмов управления моментом с использованием принципа пассивности [1],[2].

Подставив (3) в (2), получим следующие уравнения динамики ошибок обработки угловой скорости:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= -\dot{\tilde{M}}_c = -k_{oi} \eta \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c + k_\omega \eta + \frac{1}{J} \tilde{M} \\ \dot{\eta} &= -\frac{1}{\tau} \eta - \frac{1}{\tau} \tilde{\omega}. \end{aligned} \quad (4)$$

Ошибка обработки момента \tilde{M} является нелинейной функцией координат ЭПС и зависит от типа двигателя. При $\tilde{M}(t) = 0$, что справедливо, когда ЭПС находится в положении равновесия, уравнения ошибок обработки (4) являются линейными. За счет выбора настроечных коэффициентов k_ω, k_{oi} и постоянной времени фильтра τ возможно обеспечение как устойчивости номинальной динамики (4), так и желаемых показателей качества управления. Необходимо отметить, что структура системы (4), показанная на рис. 1, такая же, как и в случае настройки типовых систем регулирования скорости с подчиненным регулированием параметров на «симметричный» оптимум в электроприводе постоянного тока при аппроксимации контура регулирования тока апериодическим звеном первого порядка [4]. Благодаря этому выбор настроечных параметров регулятора скорости k_ω, k_{oi} и фильтра τ может выполняться с использованием стандартных методов теории систем с подчиненным регулированием параметров. Например, для настройки системы (4) на «симметричный» оптимум необходимо выбрать $k_\omega = 1/2\tau$ и $k_{oi} = 1/8\tau^2$.

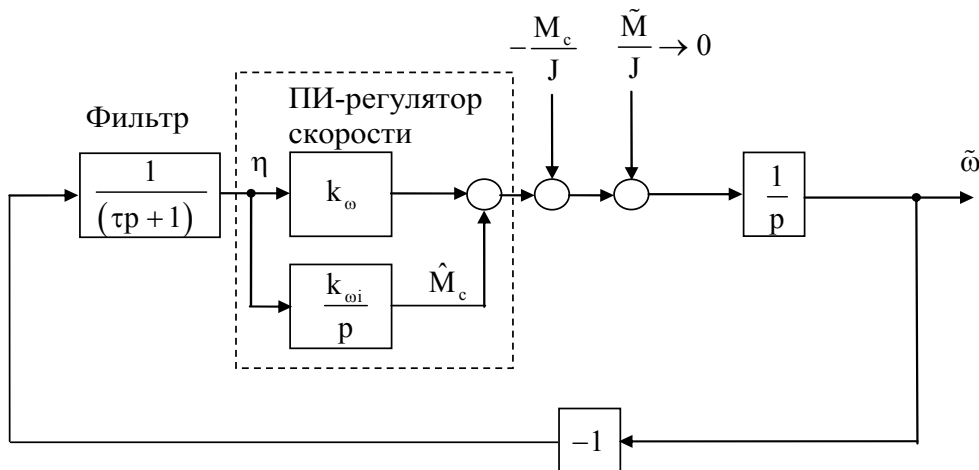


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования скорости

Вместе с тем, в отличие от типовых систем с подчиненным регулированием, где малая некомпенсируемая постоянная времени T_μ контура регулирования тока якоря (эквивалентна τ) фиксирована, постоянная времени фильтра скорости может быть выбрана сколь угодно малой или исходя из требований фильтрации измеренного сигнала угловой скорости. Поэтому, разделение во времени между динамикой контура регулирования скорости и динамикой фильтра может отличаться от используемого при оптимизации по «симметричному» оптимуму. В этом случае динамическая часть унифицированного регулятора (3) может быть модифицирована так, чтобы в максимальной степени приблизиться к структуре результирующих уравнений динамики ошибок обработки координат в МПС пониженного порядка, получаемой при $\tau = 0$ в (4):

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= -\dot{\tilde{M}}_c = k_{oi} \tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c - k_\omega \tilde{\omega} + \frac{1}{J} \tilde{M}. \end{aligned} \tag{5}$$

Рассмотрим модифицированный унифицированный регулятор (3) в следующем виде:

$$\begin{aligned} M^* &= J(\hat{M}_c + \dot{\omega}^* + \eta) \\ \dot{\tilde{M}}_c &= -\dot{\tilde{M}}_c = -k_{oi} \tilde{\omega} \\ \dot{\eta} &= -\frac{1}{\tau} \eta - \frac{1}{\tau} k_\omega \tilde{\omega}, \end{aligned} \tag{6}$$

Эквивалентные уравнения динамики ошибок обработки координат в МПС, формируемые при использовании регулятора скорости (6), равны:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= -\dot{\tilde{M}}_c = k_{oi} \tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c + \eta + \frac{1}{J} \tilde{M} \\ \dot{\eta} &= -\frac{1}{\tau} \eta - \frac{1}{\tau} k_\omega \tilde{\omega}, \end{aligned} \tag{7}$$

Структурная схема, соответствующая системе (7), изображена на рис. 2.

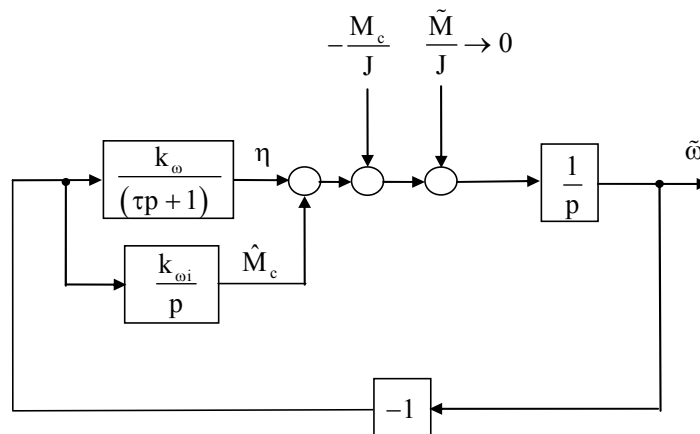


Рис. 2. Структурная схема модифицированного контура регулирования скорости

С использованием линейного преобразования координат $\tilde{\eta} = \eta + k_{\omega} \tilde{\omega}$ представим (7) в таком виде:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{M}}_c &= k_{\omega i} \tilde{\omega} \\ \dot{\tilde{\omega}} &= -\tilde{M}_c - k_{\omega} \tilde{\omega} + \tilde{\eta} \\ \dot{\tilde{\eta}} &= -\left(\frac{1}{\tau} - k_{\omega}\right) \tilde{\eta} - k_{\omega}^2 \tilde{\omega} - k_{\omega} \tilde{M}_c. \end{aligned} \tag{8}$$

Как видно из (8), динамика контура регулирования угловой скорости (7) стремится к динамике пониженного порядка (5), если величина $\tilde{\eta}$ стремится к нулю, что достигается при $\tau \rightarrow 0$.

Показатели качества системы (8) формируются с помощью трех настроечных параметров регулятора скорости $k_{\omega}, k_{\omega i}, \tau$. Разделение во времени между динамикой контура регулирования скорости и динамикой фильтра скорости в (7) может быть сформировано произвольно за счет выбора постоянной времени τ . Передаточная функция и характеристическое уравнение для контура регулирования скорости при $\tau = 0$ имеют вид:

$$W(p) = \frac{\hat{M}_c(p)}{\left(\frac{M_c}{J}(p)\right)} = \frac{k_{\omega i}}{p^2 + k_{\omega} p + k_{\omega i}}, \tag{9}$$

$$p^2 + 2\xi_s \omega_{os} p + \omega_{os}^2 = 0, \tag{10}$$

где $k_{\omega} = 2\xi_s \omega_{os}, k_{\omega i} = \omega_{os}^2, \omega_{os}$ – собственная частота недемпфированных колебаний; ξ_s – коэффициент демпфирования.

Стандартная настройка контура регулирования скорости на «модульный» оптимум при $\tau = 0$ обеспечивается выбором параметров регулятора скорости k_{ω} и $k_{\omega i}$ так, что $\xi_s = \sqrt{2} / 2$, а для получения монотонного переходного процесса (без перерегулирования) $\xi_s = 1$.

Для выбора параметра τ необходимо установить влияние на достигаемые показатели качества регулирования настроечного параметра $\rho = \omega_1 / \omega_{os}, (\omega_1 = 1 / \tau)$, который характеризует разделение во времени процессов в контуре регулирования скорости (при $\tau = 0$) и фильтре угловой скорости.

Выполнив нормирование переменных в уравнении (8), с использованием:

$$\bar{t} = \omega_{os} t, \quad \bar{M}_c = (J / M_c) \tilde{M}_c, \quad \bar{\omega} = (\omega_{os} J / M_c) \tilde{\omega}, \quad \bar{\eta} = (J / M_c) \tilde{\eta}, \quad (11)$$

получим:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{M}}_c &= \bar{\omega} \\ \dot{\bar{\omega}} &= -\bar{M}_c - 2\xi_s \bar{\omega} + \bar{\eta} \\ \dot{\bar{\eta}} &= -(\rho - 2\xi_s) \bar{\eta} - (2\xi_s)^2 \bar{\omega} - 2\xi_s \bar{M}_c. \end{aligned} \quad (12)$$

На рис. 3 и рис. 4 представлены графики нормированных переходных функций при отработке единичного скачка момента нагрузки для коэффициентов демпфирования контура регулирования скорости, равных $\xi_s = 1$ и $\xi_s = \sqrt{2} / 2$ для $\rho = 3, 6, 10, 20$. На рис. 5 приведен переходной процесс для нормированного момента двигателя $\bar{M} = M / M_c$ и нормированной ошибки регулирования угловой скорости при $\tau = 0$, то есть при $\rho \rightarrow \infty$.

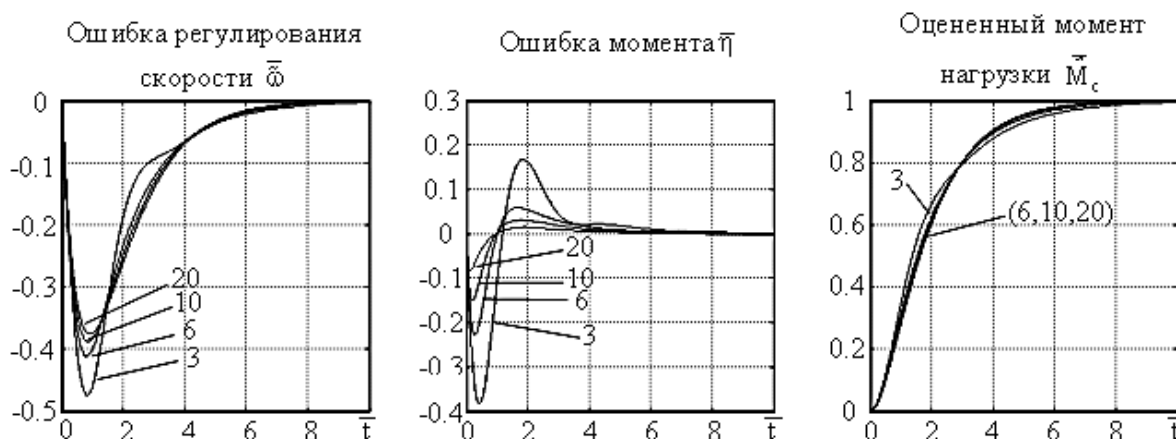


Рис. 3. Графики нормированных переходных процессов в системе регулирования скорости при $\xi = 1$ и разных значениях ρ

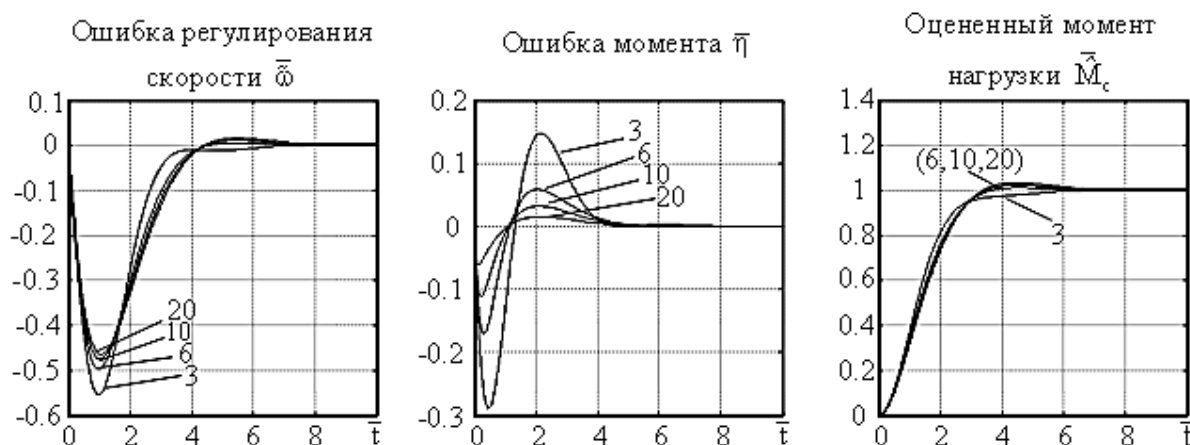


Рис. 4. Графики нормированных переходных процессов в системе регулирования скорости (7) при $\xi = \sqrt{2} / 2$ и разных значениях ρ

Из графиков переходных процессов следует, что с ростом ρ значения ошибок регулирования угловой скорости стремятся к значениям, полученным для системы пониженного порядка. При этом для $\rho > 6$ с достаточной степенью точности можно рассматривать решение пониженного порядка, которое соответствует системе (5).

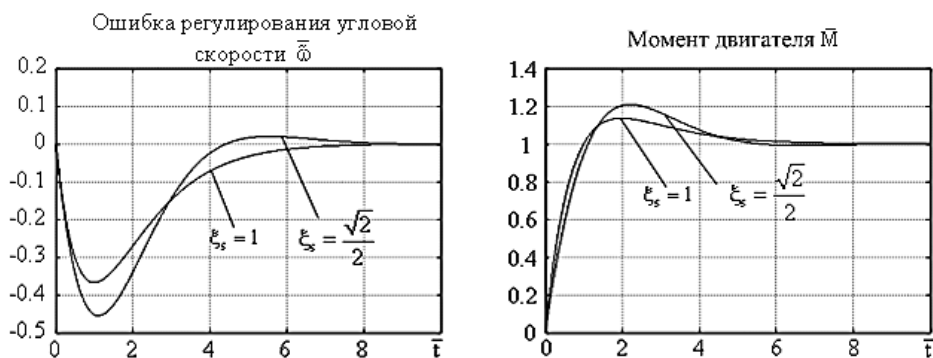


Рис. 5. Графики нормированных переходных процессов в системе регулирования скорости пониженного порядка (5)

Для данных значений момента нагрузки M_c (Н·м), момента инерции J (кг·м²), а также требуемого значения времени регулирования и максимального значения ошибки регулирования скорости $\tilde{\omega}$ (рад/с) с использованием (11) и графиков нормированных переходных процессов, представленных на рис. 3–5, рассчитываются значения частоты недемпфированных колебаний ω_{os} , а также выбираются ρ и ξ_s . По выбранным значениям ξ_s и ω_{os} определяются параметры регулятора скорости k_{ω} , $k_{\omega i}$.

ВЫВОДЫ

Представлен унифицированный регулятор угловой скорости для электромеханических систем управления угловой скоростью, основанных на принципе пассивности. Он обеспечивает асимптотическую отработку угловой скорости для основных типов электрических машин при декомпозиции их моделей на две подсистемы: механическую и электрическую. Результирующая динамика механической подсистемы линейна, со свободно задаваемыми показателями качества, состоящая из апериодического фильтра и контура регулирования скорости второго порядка. Разработана методика построения нормированных переходных характеристик, с помощью которых по заданным показателям качества возможно определить настроечные параметры регулятора скорости. Это позволяет специфицировать показатели качества без моделирования системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peresada S. *New passivity based speed-flux tracking controllers for induction motor* / Peresada S., Tilli A. and Tonielli A. // in Proc. Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society – IECON'2000. – Nagoya, Japan. – P. 1099–1104.
2. Попович Н. Г. Концепция построения и исследования электромеханических систем автоматического управления на основе принципа пассивности / Н. Г. Попович, С. М. Пересада // *Технічна електродинаміка : Тем. вип. : Проблеми сучасної електротехніки*, 2004. – С. 81–88.
3. Ortega R. *Passivity-based control of Euler-Lagrange systems* / R. Ortega, A. Loria, P. Nicklasson and H. Sira-Ramirez. – Berlin : Springer-Verlag, 1998. – 543 p.
4. Решмин Б. И. *Проектирование и наладка систем подчинённого регулирования электроприводов* / Б. И. Решмин, Д. С. Ямпольский. – М. : Энергия, 1975. – 184 с.