

УДК 519.876.5:62-83

А.Ф. Лекарев, И.С. Костарев, А.М. Гаврилов, В.О. Нагорный

Метод синтеза регулятора двухмассового электропривода

Рассмотрен метод синтеза регулятора двухмассового электропривода по гарантирующему асимптотическую устойчивость критерию отрицательной знакоопределенности отношения дифференциала сигнала скорости к сигналу ошибки по скорости. Сохранить устойчивость процесса на частоте ШИМ в широком диапазоне изменения параметров позволяет закон, согласно которому управляющий сигнал формируется как комбинация, состоящая из дифференциала сигнала скорости и произведения сигнала ошибки по скорости и периодического пилообразного сигнала.

Ключевые слова: двухмассовый электропривод, электромеханическая система, схмотехническое моделирование, широтно-импульсная модуляция, регулятор.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-104-107

Электропривод практически всегда является многомассовой электромеханической системой с упругими механическими связями. Основные особенности взаимодействия электрической и упругой механической частей системы достаточно полно выявляются при простейшем представлении механической части в виде двухмассовой упругой системы, у которой ротор электродвигателя с моментом инерции J_1 соединен посредством невесомого эквивалентного упругого вала, имеющего коэффициент жесткости c_{12} , с сосредоточенной механической нагрузкой, имеющей момент инерции, равный J_2 [1].

Модели механической части такого электропривода соответствует система уравнений:

$$\begin{cases} M_{эм} - M_c - M_{12} = J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}; \\ M_{12} - M_H = J_2 \frac{d\Omega_2}{dt}; \\ M_{12} = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2), \end{cases}$$

где $M_{эм}$ – электромагнитный момент; M_c – потери вращающего момента на трение в электродвигателе; M_{12} – вращающий момент, передаваемый с вала электродвигателя на выходной вал; $\varphi_1 - \varphi_2$ – деформация невесомого эквивалентного упругого вала; φ_1 , φ_2 – угловое положение вала электродвигателя и выходного вала; Ω_1 , Ω_2 – частота вращения вала двигателя и выходного вала.

Регулировочные характеристики большинства управляемых бесконтактных электроприводов при современных способах управления аналогичны характеристикам управляемых электроприводов с электродвигателем постоянного тока, а на периоде коммутации их силовую цепь можно привести к силовой цепи электродвигателя постоянного тока [2], поэтому для синтеза регулятора двухмассового электропривода использована модель данного электродвигателя.

В электродвигателе постоянного тока при любом положении ротора вектор магнитного поля и вектор поля якоря составляют угол, приближающийся к прямому, соответственно уравнения процесса электромеханических преобразований имеют вид

$$\begin{cases} U_{дв} = i_{дв} R_{дв} + L_{дв} di_{дв} / dt + E_{дв}; \\ M_{эм} = k_M \Phi_{дв} i_{дв} = c_M i_{дв}; \\ E = k_M \Phi_{дв} \Omega_1 = c_M \Omega_1, \end{cases}$$

где $U_{дв}$, $i_{дв}$, $L_{дв}$, $R_{дв}$, $E_{дв}$ – напряжение, ток, индуктивность, активное сопротивление и ЭДС вращения в силовой цепи электродвигателя; $\Phi_{дв}$ – магнитный поток полюса; c_M – коэффициент преобразований электродвигателя; k_M – коэффициент электродвигателя.

Для представления электромеханической системы в виде электрической схемы можно использовать современные пакеты схмотехнического моделирования, которые позволяют реализовать различные формы представления моделей, объединяя возможности моделирования принципиальных и функциональных схем, и поэтому могут эффективно служить для исследования и проектирования электроприводов.

Электрические цепи являются моделями прямой аналогии многих физических систем. Составление электрических цепей-моделей производится в соответствии с методом электромеханических аналогий, основанном на подобию дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы различной физической природы. Электромеханические аналогии позволяют исследовать механические системы на компонентном уровне, что дает возможность более наглядно учитывать влияние отдельных параметров на характеристики системы. При этом моделирование отдельных узлов может производиться на функциональном (формированием передаточных функций) и на компонентном (использованием электромеханических аналогий) уровнях.

Модель силовой части двухмассового электропривода (рис. 1) состоит из электродвигателя постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов, присоединенного к механической нагрузке через упругий вал, при этом механическая часть выполнена электромеханическими аналогиями с параметрами, приведенными к силовой электрической цепи электродвигателя:

$$i_{дв} = \frac{M_{эм}}{c_M}; \quad i_{п1} = \frac{M_{п1}}{c_M}; \quad i_{п2} = \frac{M_{п2}}{c_M};$$

$$i_{12} = \frac{M_{12}}{c_M}; \quad i_n = \frac{M_n}{c_M};$$

$$U_1 = E = c_M \Omega_1; \quad U_2 = c_M \Omega_2;$$

$$C_1 = \frac{J_1}{c_M^2}; \quad C_2 = \frac{J_2}{c_M^2}; \quad L_{12} = \frac{c_M^2}{c_{12}}$$

где $i_{п1}$, $i_{п2}$, i_{12} , i_n – составляющие тока силовой цепи электродвигателя, соответствующие составляющим электромагнитного момента – статического момента потерь в первом ($M_{п1}$) и втором ($M_{п2}$) звеньях механической части системы, момента передачи во второе звено механической части системы (M_{12}) и момента нагрузки (M_n); C_1 и C_2 – емкости, имитирующие момент инерции звеньев механической части (соответственно J_1 и J_2); L_{12} – индуктивность, имитирующая податливость невесомого эквивалентного упругого вала, значение которой обратно пропорционально его жесткости c_{12} .

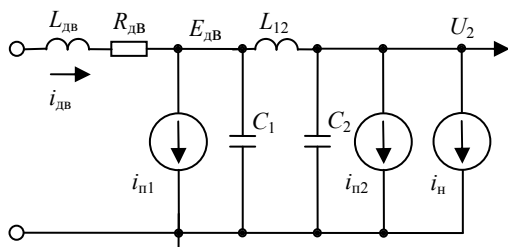


Рис. 1. Модель силовой части двухмассового электропривода

Энергетический канал электропривода с импульсной модуляцией состоит из нелинейной импульсной части, непрерывной части и канала управления. Управление при этом основано на изменениях структуры системы, которые определяют динамические процессы, обеспечивающие преобразование одного вида энергии в другую с заданным качеством. Поскольку энергетические и динамические процессы при этом взаимно обусловлены, а изменение координат, характеризующих движение системы, связано с накоплением и передачей энергии в реактивных элементах ее непрерывной части, то процессы управления желательно рассматривать совместно с процессами преобразования энергии. Поэтому синтез закона управления электроприводом предлагается осуществлять по гарантирующему асимптотическую устойчивость критерию отрицательной знакоопределенности отношения

$$\dot{x}/x = -k,$$

где x – сигнал ошибки, равный разности выходной и заданной частот вращения.

Этот подход реализуется в системах со скользким процессом, работающих в релейном режиме [3].

Основной недостаток этого способа управления – большой диапазон изменения частоты переключения, что приводит к увеличению динамических потерь в регулирующем элементе, усложнению

фильтрации и ухудшению электромагнитной совместимости аппаратуры.

Обеспечить устойчивость квазискользящего процесса на частоте ШИМ в широком диапазоне изменения параметров позволяет закон управления, при котором управляющий сигнал F формируется в блоке управления как комбинация, состоящая из сигнала \dot{x} и произведения сигналов x и периодического пилообразного Y_n [4] F_d :

$$F = T_d \dot{x} + (1 - Y_n)x; \quad (1)$$

$$Y_n = t/T,$$

где T_d – коэффициент передачи производной сигнала ошибки; T – период широтно-импульсной модуляции.

Двухмассовый электропривод можно представить как две парциальные системы второго порядка, связанные друг с другом таким образом, что колебания в одной из них влияют на колебания в другой и наоборот. Исходя из этого, для формирования структуры закона управления необходимо выполнение условия

$$\frac{C_1 \dot{x}_1 + C_2 \dot{x}_2}{C_1 x_1 + C_2 x_2} = -k, \quad (2)$$

гарантирующего асимптотическую устойчивость процесса для эквивалентного сигнала ошибки $x_3 = U_3 - U_{оп}$ (с учетом, что $U_1 = E_{дв} \equiv \Omega_1$, $U_2 \equiv \Omega_2$, $U_{оп} \equiv \Omega_{оп}$), где $x_1 = U_1 - U_{оп}$, $x_2 = U_2 - U_{оп}$ – сигналы ошибки первого и второго звена; U_1 , U_2 – напряжение (частота вращения) первого и второго звена; U_3 – эквивалентное напряжение (частота вращения); $U_{оп}$ – напряжение (частота вращения) задания.

В свою очередь

$$U_3 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 + \frac{C_2}{C_1 + C_2} U_2,$$

так как $C_1 \dot{x}_1 = i_{C1}$; $C_2 \dot{x}_2 = i_{C2}$; а $i_{C1} + i_{C2} = i_{дв} - i_n = \tilde{i}_{дв}$.

Здесь $C_1 \dot{x}_1$, $C_2 \dot{x}_2$ – дифференцированные выходные сигналы частоты вращения вала двигателя и нагрузки; i_{C1} , i_{C2} – пульсирующие составляющие токов, имитирующие пульсирующие составляющие моментов вращения на валу двигателя и нагрузки; $i_{дв}$ – ток двигателя; i_n – ток, имитирующий момент нагрузки, приведенный к току двигателя. Тогда с учетом выражения (2) закон управления (1) для двухмассового электропривода приводится к виду

$$F = k_m \tilde{i}_{дв} + (U_3 - U_{оп})(1 - Y_n); \quad (3)$$

$$VT = \begin{cases} \theta & \text{при } 0 < t_п < t_к; \\ \bar{\theta} & \text{при } t_к < t_п < T, \end{cases}$$

где $U_{оп}$ – заданная частота (ЭДС) вращения; k_m – коэффициент связи; $\tilde{i}_{дв}$ – пульсирующая составляющая тока двигателя; U_1 , U_2 – ЭДС вращения вала двигателя и напряжение, имитирующие частоту вращения вала двигателя и подсоединенной нагрузки; VT – состояние ключевого элемента (при модуляции заднего фронта $\theta = 1$, при модуляции передне-

го фронта $\theta = 0$); $Y_{\pi} = \theta \left(1 - \frac{t_{\pi}}{T}\right) + \bar{\theta} \left(\frac{t_{\pi}}{T}\right)$ – пилообразный сигнал; $t_{\pi} = T \{t/T\}$ – временная координата для формирования пилообразного сигнала ($\{a\}$ – дробная часть числа a); T – длительность периода коммутации; t_k – момент коммутации, определяемый при модуляции заднего фронта корнем уравнения $F = 0$ при $\dot{F} > 0$, а при модуляции переднего фронта корнем уравнения $F = 0$ при $\dot{F} < 0$.

На электрической схеме модели двухмассового электропривода (рис. 2) электродвигатель и подсоединенная к нему нагрузка представлены электромеханическими аналогиями: C_1, C_2 – емкости конденсаторов первого и второго звена, имитирующие момент инерции вала двигателя и подсоединенной нагрузки соответственно; $L_{дв}$ – индуктивность обмотки двигателя; L_{12} – индуктивность, имитирующая податливость передачи к подсоединенной нагрузке (приведенная к силовой цепи питания); U_1, U_2 – ЭДС вращения и напряжение, имитирующие частоту вращения вала двигателя и подсоединенной нагрузки (приведенные к ЭДС вращения).

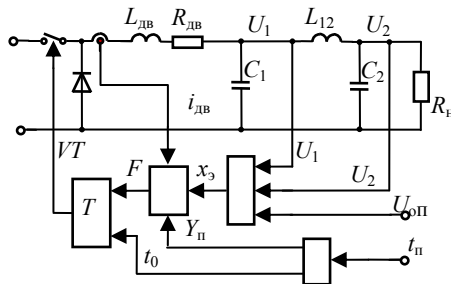


Рис. 2. Электрическая схема модели двухмассового электропривода

Переходный процесс пуска, наброса и сброса нагрузки двухмассового электропривода (рис. 3) представлен параметрами: номинальный момент вращения $M_{ном} = 20$ Н·м; номинальная частота вращения $\Omega_{ном} = 50$ рад/с; индуктивность силовой цепи двигателя $L_{дв} = 0,8$ мГн; сопротивление силовой цепи двигателя $R_{дв} = 0,678$ Ом; момент инерции вала двигателя $J_1 = 3 \cdot 10^{-6}$ кг·м²; момент инерции нагрузки $J_2 = 7 \cdot 10^{-6}$ кг·м²; податливость вала $L_{12} = 0,38 \cdot 10^{-3}$ рад/(Н·м).

Таким образом, в электроприводе с регулятором, реализующим управление по выражению (3) с частотой ШИМ 20 кГц, в переходных режимах (пуск до частоты вращения 5000 об/мин под нагрузкой 10,0 Н·м, наброс нагрузки с 10,0 до 20,0 Н·м на частоте вращения 50 рад/с), управляющий сигнал F обеспечивает устойчивость управления эквивалентным выходным напряжением U , и хорошее демпфирование колебаний напряжения (частоты вращения) между звеньями электропривода, при этом его можно представить как

$$F = k_m \dot{i}_{дв} + (U_2 - U_{оп} + F_d)(1 - Y_{\pi}),$$

где $F_d = \frac{C_1}{C_1 + C_2}(U_1 - U_2)$ – демпфирующий сигнал.

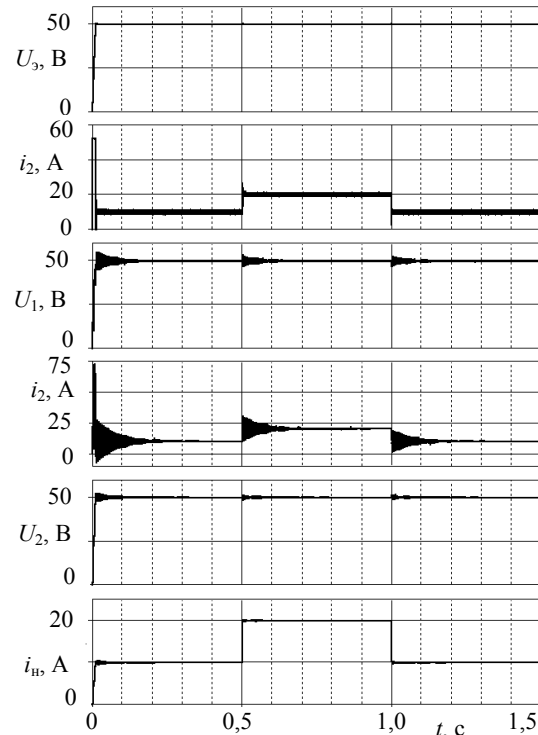


Рис. 3. Переходный процесс пуска, наброса и сброса нагрузки

Выводы

1. Современные пакеты схемотехнического моделирования могут эффективно служить для исследования и проектирования электромеханических систем.
2. Обеспечить устойчивость квазискользящего процесса на частоте ШИМ в широком диапазоне изменения параметров позволяет закон управления, при котором управляющий сигнал формируется как комбинация, состоящая из дифференциала сигнала скорости и произведения сигналов ошибки по скорости и периодического пилообразного.
3. Предложенный закон управления с использованием эквивалентного сигнала скорости двухмассового электропривода обеспечивает хорошее демпфирование колебаний частоты вращения между звеньями электропривода.

Литература

1. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с.
2. Казанцев Ю.М. Разработка модели и синтез регулятора бесконтактного электропривода / Ю.М. Казанцев, А.Ф. Лекарев // Приборы и системы. Сер. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 6. – С. 22–25.
3. Теория систем с переменной структурой / С.В. Емельянов и др. – М.: Изд-во физико-математической литературы, 1970. – 692 с.
4. Казанцев Ю.М. Формирование квазискользящих процессов в импульсных преобразователях с ШИМ / Ю.М. Казанцев, А.И. Чернышев, А.Ф. Лекарев // Электричество. – 1993. – № 12. – С. 45–49.

Лекарев Анатолий Федорович

Канд. техн. наук, вед. науч. сотр. АО «НПЦ «Полус», Томск
Тел.: 8 (382-2) 60-66-38
Эл. почта: polus@online.tomsk.net

Костарев Игорь Степанович

Канд. техн. наук, начальник отд. АО «НПЦ «Полус»
Тел.: 8 (382-2) 60-66-38
Эл. почта: kostarevis@mail.ru

Гаврилов Анатолий Михайлович

Инженер-конструктор 1 кат. АО «НПЦ «Полус»
Тел.: 8 (382-2) 60-66-87
Эл. почта: polus@online.tomsk.net

Нагорный Василий Олегович

Аспирант, инженер-конструктор I кат. АО «НПЦ «Полус»
Тел. 8 (382-2) 60-66-87
Эл. почта: polus@online.tomsk.net

Lekarev A.F., Kostarev I.S., Gavrilov A.M., Nagorniy V.O.
Synthesis method for two-mass electrical drive regulator

A synthesis method for two-mass electrical drive regulator that guarantee asymptotic stability to the criterion of the negative sign-definiteness of the differential speed signal ratio to the error signal for speed has been considered. The stability of the process at the PWM frequency in a wide range of variation of the parameters is maintained by the law, according to which the control signal is formed as a combination of differential speed signal and the result of the error signals for speed and a periodic sawtooth one.

Keywords: two-mass electrical drive, electromechanical system, circuit simulation, pulse width modulation, controller.