

УДК 621.313.333

ЭЛЕКТРОПРИВОД КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПОЛОЖЕНИЯ

А.В. Аристов

Томский политехнический университет
E-mail: Parist@sibmail.com

Представлены алгоритмы и функциональные схемы электроприводов колебательного движения, позволяющие компенсировать уход геометрической нейтрали положения при пуске и регулировании частоты колебания при работе на симметричную и несимметричную нагрузку. Дана оценка влияния обратной связи по положению на амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения с учетом позиционной нагрузки.

Ключевые слова:

Электропривод колебательного движения, геометрическая нейтраль положения, обратная связь.

Key words:

Oscillatory electric drive, geometric neutral position, feedback.

Стремление к обеспечению безударного пуска электропривода колебательного движения на заданную частоту при работе его в асинхронном режиме [1] сопровождается, как правило, динамическим смещением нейтрали колебаний, что крайне нежелательно, а в иных случаях и вообще недопустимо для ряда технологических процессов. Как показывает практика создания колебательных электроприводов в ТПУ избежать нежелательного смещения нейтрали колебаний возможно двумя путями: либо за счет обеспечения требуемого алгоритма работы электропривода при регулировании частоты колебаний, либо за счет введения в управляющий сигнал составляющих, пропорциональных фиктивной жесткости или позиционной нагрузке.

В первом случае эффект стабилизации ухода геометрической нейтрали колебаний может быть достигнут в электроприводах колебательного движения, выполненных по разомкнутому циклу. Как известно, такой электропривод характеризуется более высокими предельными кинематическими и силовыми характеристиками в виду отсутствия датчика обратной связи.

Для фазового способа возбуждения колебательного режима работы установившееся значение динамического смещения нейтрали колебаний при нулевых начальных условиях и малой глубине модуляции периодической составляющей коэффициента электромагнитного демпфирования исполнительного двигателя может быть найдено из решения системы уравнений, описывающей математическую модель электропривода колебательного движения [2] как

$$\chi_0 = \frac{-\chi_m (\sin \alpha + \Omega L_{\text{мех}} \cos \alpha)}{R_{\text{мех}} + f_0}, \quad (1)$$

где χ_m , α – амплитуда и фаза установившихся колебаний подвижного элемента привода; Ω – угловая частота колебаний; $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$ – составляющие инерционной и демпфирующей сил нагрузки; f_0 – коэффициент электромагнитного демпфирования двигателя. В свою очередь начальная фаза установившихся колебаний определяется выражением

$$\alpha = \arctg \frac{-N_2 L_{\text{мех}} \Omega^2 + (f_0 + R_{\text{мех}}) N_1 \Omega}{-N_1 L_{\text{мех}} \Omega^2 - (f_0 + R_{\text{мех}}) N_2 \Omega}. \quad (2)$$

Здесь N_1 , N_2 – составляющие пускового колебательного момента исполнительного двигателя, определяемые параметрами электрической машины и функциями регулирования согласно [3]. Совместное решение (1), (2) с учетом, что при полной компенсации динамического смещения нейтрали $\chi_0=0$, позволяет сначала установить функциональную зависимость изменения частоты колебаний Ω от составляющих электромагнитного колебательного момента

$$\Omega = \frac{1}{2N_1 L_{\text{мех}}} \left[\frac{N_2 (a - R_{\text{мех}}) + \sqrt{N_2^2 (a - R_{\text{мех}})^2 - 4N_1^2 (f_0 - R_{\text{мех}})}}{+ \sqrt{N_2^2 (a - R_{\text{мех}})^2 - 4N_1^2 (f_0 - R_{\text{мех}})}} \right],$$

где $a=1-f_0$, а затем перейти к зависимости частоты колебаний от напряжения на обмотке управления исполнительного двигателя U_y

$$\Omega = U_y^2 A, \quad (3)$$

где A – постоянный коэффициент, определяемый как

$$A = \frac{C_g}{L_{\text{мех}}} \left\{ \left[\frac{N_2'}{N_1'} + 1 \right]^{0.5} - \frac{N_2'}{N_1'} \right\}.$$

Здесь C_g – составляющая коэффициента электромагнитного демпфирования двигателя, зависящая только от параметров электрической машины; $N_1' = N_1/U_y$, $N_2' = N_2/U_y$.

На рис. 1 представлен один из вариантов функциональной схемы, реализующий алгоритм (3), а в таблице – результаты измерений динамического смещения нейтрали, полученные при экспериментальных исследованиях опытного образца электропривода колебательного движения.

Функциональная схема включает в себя преобразователь разности частот в код (ПЧК), функциональный преобразователь (ФП), усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (УС), преобразователь частоты (ПЧ), синхронизированный по частоте с частотой сети и инвертор напряжения (ИН).

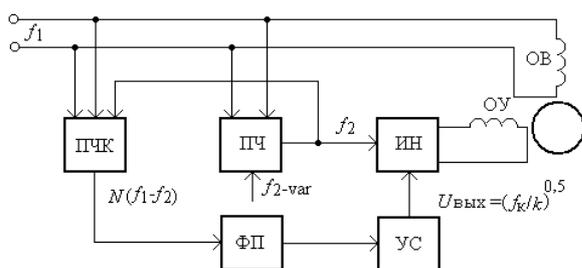


Рис. 1. Функциональная схема электропривода колебательного движения с алгоритмической стабилизацией нейтрали положения

Как видно из рис. 1 обмотка возбуждения (ОВ) исполнительного двигателя подключается непосредственно к источнику переменного напряжения частоты f_1 , а обмотка управления (ОУ) через инвертор напряжения ИН запитывается от преобразователя частоты ПЧ напряжением частоты f_2 , что позволяет исключить влияние девиации частоты питания f_1 на частоту колебаний f_k и повысить координатную точность электропривода. Преобразователь разности частот в код ПЧК осуществляет определение частоты колебаний $f_k = \Omega / 2\pi = f_1 - f_2$ с последующим преобразованием ее в n -разрядный параллельный двоичный код N . Поступая на функциональный преобразователь ФП, выполненный на основе перемножающего ЦАП, последний, сперва преобразуется в напряжение постоянного тока U , а затем в функциональную зависимость $U_{\text{ФП}} = (U/k_1)^{0.5}$, где k_1 – коэффициент передачи ФП. Сформированное таким образом напряжение на выходе преобразователя ФП в функции частоты колебания вала исполнительного двигателя f_k , производит регулирование коэффициента передачи усилителя УС, а, следовательно, и выходного напряжения инвертора ИН по закону

$$U_{\text{вых}} = (f_k / k)^{0.5},$$

где k – включает в себя коэффициенты передачи функционального преобразователя и инвертора.

Как показывают результаты экспериментального исследования (табл.), отклонение нейтрали при регулировании частоты колебания в диапазоне от 2 до 25 Гц составляет всего 11 %, в то время как при невыполнении алгоритма (3) – 52 %.

Таблица. Сравнение результатов испытания электропривода колебательного движения при выполнении и невыполнении алгоритма стабилизации нейтрали колебания

Алгоритм (3)		$f_k, \text{ Гц}$					
		2	5	10	15	20	25
Не выполняется	$\chi_0,$	-160	-140	-120	-113	-105	-104
Выполняется	град.	-1,7	-1,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5

Во втором случае, стабилизация динамического отклонения нейтрали колебания за счет введения в управляющий сигнал составляющих, пропорциональных фиктивной жесткости или позиционной

нагрузке может быть рекомендована при работе электропривода колебательного движения как на симметричную, так и несимметричную нагрузку. Однако, при практической реализации электропривода колебательного движения введение обратной связи требует увеличение установленной мощности исполнительного двигателя и наличия датчика обратной связи.

При введении фиктивной жесткости изменение динамических свойств колебательной системы обеспечивается путем введения дополнительных электромагнитных связей, создающих усилие, пропорциональное смещению нейтрали колебаний и направлению навстречу вынужденной силе. При этом имеется возможность регулирования жесткости системы за счет изменения глубины обратной связи и, соответственно, частоты собственных колебаний, что повышает энергетические показатели привода в целом.

Если на обмотку возбуждения исполнительного двигателя подать напряжение частоты f_1

$$U_{\text{ов}} = U_{m1} \sin(2\pi f_1 t + \gamma),$$

а на обмотку управления

$$U_y = U_{m2} \sin(2\pi f_2 + \beta) - U_{m3} \cos(2\pi f_1 + \gamma) \text{sign} \chi,$$

где U_{m1}, U_{m2}, U_{m3} – амплитудные значения напряжений соответственно обмотки возбуждения, управления и обратной связи; γ, β – начальные фазы питающих напряжений, то результирующий электромагнитный поток, возникающий в воздушном зазоре исполнительного двигателя, будет иметь две составляющие: колебательную, обусловленную взаимодействием напряжений с амплитудами U_{m1} и U_{m2} , и вращательную – обусловленную напряжениями с амплитудами U_{m1} и U_{m3} . Знак последней составляющей будет определяться знаком закона движения подвижного элемента привода χ . Результирующий вектор электромагнитного потока будет изменяться по закону

$$\varphi_0 = \text{arctg} \left[\frac{\frac{\Phi_{m2} \sin(2\pi f_2 + \beta)}{\Phi_{m1} \sin(2\pi f_1 + \gamma)} - \frac{\Phi_{m3} \cos(2\pi f_1 + \gamma) \text{sign} \chi}{\Phi_{m1} \sin(2\pi f_1 + \gamma)}}{\Phi_{m1} \sin(2\pi f_1 + \gamma)} \right].$$

Здесь Φ_{m1}, Φ_{m2} и Φ_{m3} – амплитудные значения составляющих электромагнитного поля. Если пренебречь высокочастотными пульсациями суммарной частоты $f_1 + f_2$, то можно считать что результирующее поле колеблется в зазоре исполнительного двигателя с частотой Ω , периодически меняя направление движения на противоположное, компенсируя смещение нейтрали положения.

На рис. 2 представлена функциональная схема электропривода колебательного движения, реализующая данный способ управления нейтралью положения. На нем кроме уже известных блоков ПЧ и ИН представлены: фазовращатель ФВ, сумматор, умножитель напряжений, датчик положения (ДП) и релейный элемент.

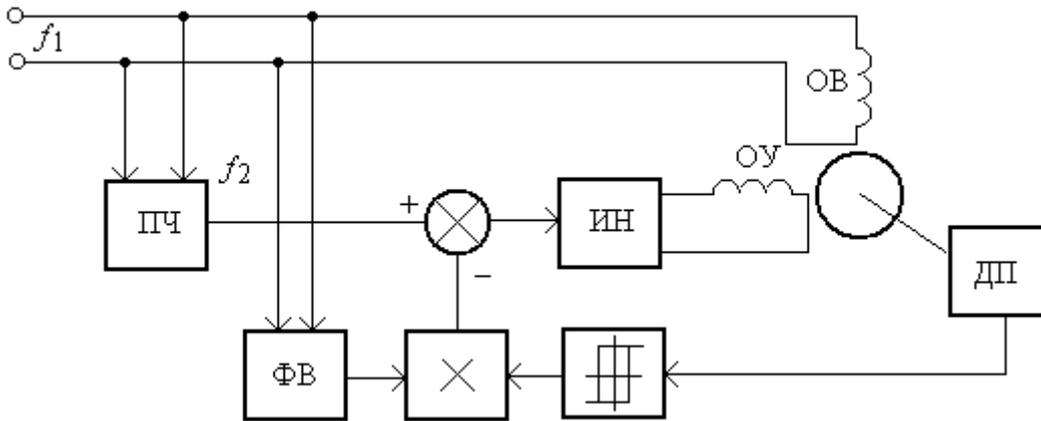


Рис. 2. Функциональная схема электропривода колебательного движения с обратной связью по положению

Фазовращатель ФВ сдвигает напряжение частоты f_1 по фазе на 90° . Датчик положения ДП оценивает текущее значение координаты подвижного элемента двигателя и передает информацию на релейный элемент. Последний формирует сигнал единичного уровня, знак которого определяет направление движения вращательной составляющей электромагнитного поля.

На рис. 3 представлены временные зависимости координаты подвижного элемента двигателя при наличии обратной связи и без неё. Как видно, стабилизация нейтральной позиции достигается в течение 2–3 периодов частоты колебания и зависит главным образом от глубины обратной связи и величины нагрузки.

Влияние глубины обратной связи на амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения можно оценить на основании анализа уравнения движения электропривода

$$L_{\text{мех}} \frac{d^2 \chi}{dt^2} + (f_0 - R_{\text{мех}}) \frac{d\chi}{dt} + (-f_{\text{ос}}) \chi = M_{\text{пуск}} \sin(\Omega t + \psi), \quad (4)$$

где $f_{\text{ос}}$ – коэффициент электромагнитной фиктивной жесткости, вызванный наличием обратной связи по положению и определяемый как

$$f_{\text{ос}} = U_{m1} U_{m3} \frac{\mu_0 f_1}{\mu_1 + \mu_2 f_1^2 + \mu_3 f_1^4},$$

где $M_{\text{пуск}}$, ψ – значение амплитуды и фазы колебательной составляющей пускового усилия; μ_0 , μ_1 , μ_2 , μ_3 – коэффициенты, определяемые параметрами электрической машины.

Из решения уравнения движения (4), например, методом гармонического баланса, значения амплитуды и фазы первой гармонической составляющей закона движения подвижного элемента привода с учетом обратной связи можно найти как

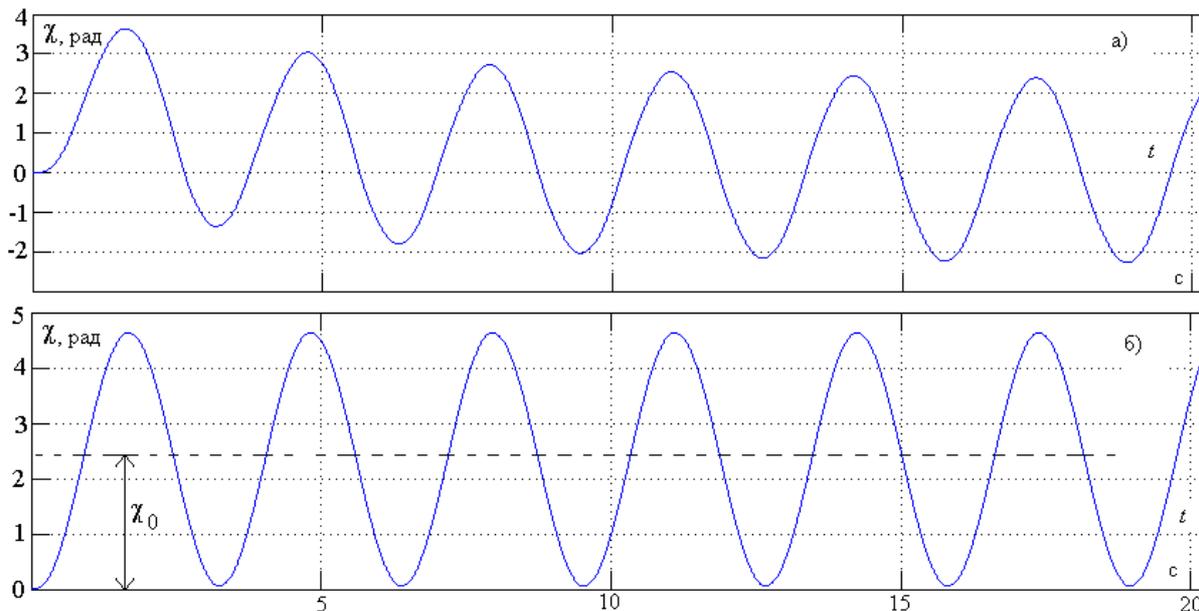


Рис. 3. Временные зависимости изменения координаты подвижного элемента двигателя при наличии обратной связи по положению (а) и без обратной связи (б)

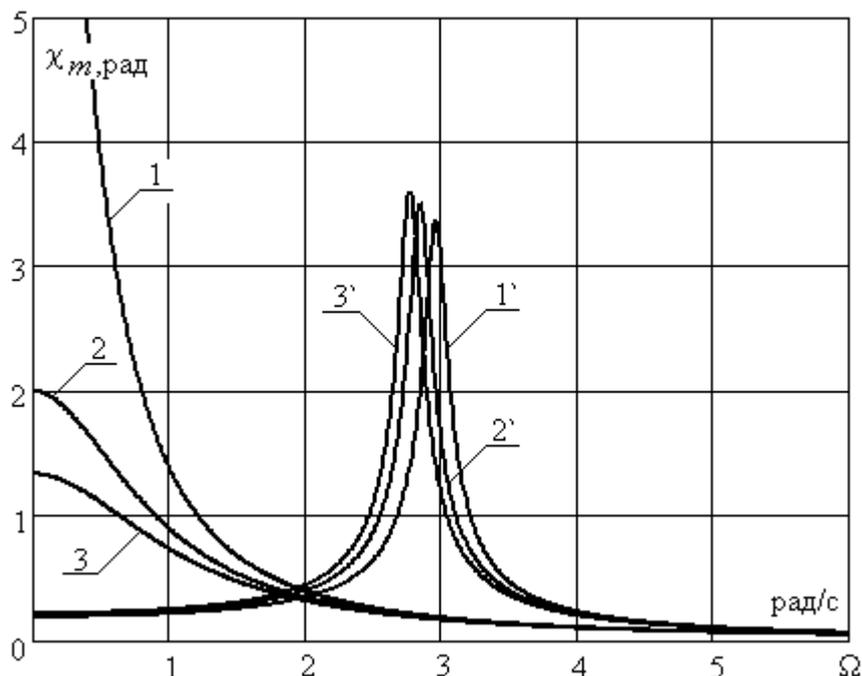


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения при наличии обратной связи по положению. f_{oc} : 1) 0,1; 2) 0,5; 3) 0,75 о.е. при отсутствии и 1') 0,1; 2') 0,5; 3') 0,75 о.е. при наличии позиционной нагрузки

$$\chi_m = \sqrt{\frac{(N_1^2 + N_2^2)}{(-f_{oc} - L_{мех}\Omega^2)^2 + (f_0 + R_{мех})^2\Omega^2}},$$

$$\alpha = \arctg \frac{-N_2(f_{oc} + L_{мех}\Omega^2) + (f_0 + R_{мех})N_1\Omega}{-N_1(f_{oc} + L_{мех}\Omega^2) - (f_0 + R_{мех})N_2\Omega}.$$

Полученные выражения позволяют оценить все пространство амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик при наличии обратной связи по положению, а также получить выражения для регулировочных характеристик, путем подстановки в значения для N_1 , N_2 , f_{oc} зависимостей от управляющих сигналов.

В качестве примера на рис. 4 представлены амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения для различных значений глубины обратной связи (кривые 1–3). Как видно, обратная связь приводит к уменьшению амплитуды колебаний. Следует заметить, что полученные выражения получены при отсутствии позиционной нагрузки. Если позиционная нагрузка

присутствует, то в колебательной системе может наблюдаться электромеханический резонанс, и введение отрицательной связи по положению будет смещать резонансный пик и, соответственно, собственную частоту электромеханической колебательной системы вправо (рис. 4, кривые 1'–3'). При резонансе независимо от величины демпфирующей нагрузки амплитуда колебаний максимальна. Если соответствующим образом подобрать зависимость между f_{oc} и частотой колебаний Ω , то можно регулировать собственную частоту и амплитуду колебаний в достаточно широкий пределах, поддерживая тем самым энергетически выгодный резонансный режим работы.

В заключение следует отметить, что указанные методы стабилизации нейтрали колебаний могут быть положены в основу создания электроприводов колебательного движения с амплитудно-частотной характеристикой, резонансный пик которой имеет заданную величину в требуемом диапазоне частот колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В., Паюк Л.А. Управление переходными процессами в электрических машинах переменного тока // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. – С. 59–64.
2. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

3. Луковников В.И., Зиновьев Г.Г., Аристов А.В. Точность управления асинхронными электродвигателями колебательного движения // Электричество. – 1984. – № 7. – С. 72–76.

Поступило 10.12.2010 г.