

УДК 621.313.333

А.В. Аристов

## Электропривод колебательного движения с регулируемой собственной частотой

Представлены функциональная схема электропривода колебательного движения и алгоритмы, позволяющие регулировать собственную частоту с целью поддержания резонансного режима работы и стабилизации параметров колебаний. Проведен сравнительный анализ энергетического фактора при наличии и отсутствии обратной связи по положению.

**Ключевые слова:** электропривод колебательного движения, геометрическая нейтраль положения, обратная связь, резонансный режим, энергетический фактор.

В последнее время значительно возросла роль энергосберегающей политики в области разработки и эксплуатации вибрационной аппаратуры и в частности электроприводов колебательного движения (КЭП). При этом особое внимание уделяется необходимости создания энергоэффективных управляемых КЭП на базе серийных (при необходимости частично модернизированных) асинхронных двигателей, колебательный режим в которых возбуждается с помощью периодического мягкого реверса [1]. Одним из путей повышения энергетических характеристик КЭП является обеспечение резонансного режима его работы. Последнее достигается либо за счет введения в колебательную систему позиционной нагрузки в виде механических, гидравлических или пневматических упругих связей, либо за счет введения в управляющий сигнал составляющих, пропорциональных фиктивной жесткости системы, либо за счет применения комбинированного способа, сочетающего первых два.

В первом случае резонансный режим работы может быть обеспечен только для одной фиксированной частоты колебания. Несмотря на это, такие вибрационные системы находят достаточно широкое применение в различных технологических процессах [2].

Во втором случае при введении фиктивной жесткости изменение динамических свойств колебательной системы обеспечивается путем введения дополнительных электромагнитных связей, создающих усилие, пропорциональное смещению нейтрали колебаний и направленное навстречу вынужденной силе. При этом имеется возможность регулирования жесткости системы за счет изменения глубины обратной связи и, соответственно, частоты собственных колебаний.

Если на обмотку возбуждения двухфазного исполнительного двигателя подать напряжение частоты  $\omega_1$ :

$$U_{\text{ов}} = U_{m1} \sin(\omega_1 t + \gamma),$$

а на обмотку управления  $\omega_1$  и  $\omega_2$ :

$$U_y = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta) \pm U_{m3} \cos(\omega_1 t + \gamma) \text{sign} \chi, \quad (1)$$

где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$ ,  $U_{m3}$  – амплитудные значения напряжений соответственно обмотки возбуждения, управления и обратной связи;  $\gamma$ ,  $\beta$  – начальные фазы питающих напряжений;  $\chi$  – закон движения подвижного элемента привода; знак «+» соответствует положительной, а «-» – отрицательной обратной связи по положению, 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  $U_{m3}$ . Как видно из выражения (1), знак последней составляющей будет определяться видом обратной связи и знаком закона движения подвижного элемента привода  $\chi$ . В результате взаимодействия напряжений результирующий вектор электромагнитного потока будет изменяться по закону

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

Здесь  $\Phi_{m1}$ ,  $\Phi_{m2}$  и  $\Phi_{m3}$  – амплитудные значения составляющих электромагнитного поля.

Если пренебречь высокочастотными пульсациями суммарной частоты  $\omega_1 + \omega_2$ , то можно считать, что результирующее электромагнитное поле колеблется в зазоре исполнительного двигателя с частотой  $f_k = \Omega/2\pi = (\omega_1 - \omega_2)/2\pi$ , периодически меняя направление движения на противоположное, компенсируя смещение нейтрали колебания за счет фиктивной позиционной нагрузки.

Влияние глубины обратной связи на амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения можно оценить на основании анализа уравнения движения электропривода. Для этого были определены значения фазных токов и их первых производных по скорости из решения системы уравнений, описывающей электромеханический преобразователь энергии [3] с помощью корней характеристических уравнений функций регулирования вида (1), а затем – значение электромагнитного момента. При нулевых начальных условиях и малой глубине модуляции периодической составляющей коэффициента электромагнитного демпфирования исполнительного двигателя после разложения колебательного электромагнитного усилия в ряд Маклорена по степеням скорости в окрестности точки  $d\chi/dt = 0$  уравнение движения принимает вид

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

где  $L_{\text{мех}}$ ,  $C_{\text{мех}}$ ,  $R_{\text{мех}}$  – коэффициенты инерционной, позиционной и демпфирующего усилия нагрузки;  $f_0$  – коэффициент электромагнитного демпфирования электродвигателя;  $f_{\text{ос}}$  – коэффициент электромагнитной фиктивной жесткости, вызванный наличием обратной связи по положению и определяемый как

$$f_{\text{ос}} = U_{m1} U_{m3} \frac{\mu_0 f_1}{\mu_1 + \mu_2 f_1^2 + \mu_3 f_1^4}; \quad (3)$$

$M_{\text{пуск}}$ ,  $\psi$  – значение амплитуды и фазы колебательной составляющей пускового усилия;  $\mu_0$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $\mu_3$  – коэффициенты, определяемые параметрами электрической машины.

Из решения (2) первая гармоническая составляющая закона движения подвижного элемента привода запишется:

$$\chi(t) = \chi_m \sin(\Omega t + \alpha),$$

где амплитуда  $\chi_m$  и начальная фаза колебаний  $\alpha$  рассчитываются по выражениям:

$$\chi_m = \frac{M_{\text{пуск}}}{\sqrt{(C_{\text{мех}} \pm f_{\text{ос}} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + (f_0 + R_{\text{мех}})^2 \Omega^2}}; \quad (4)$$

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

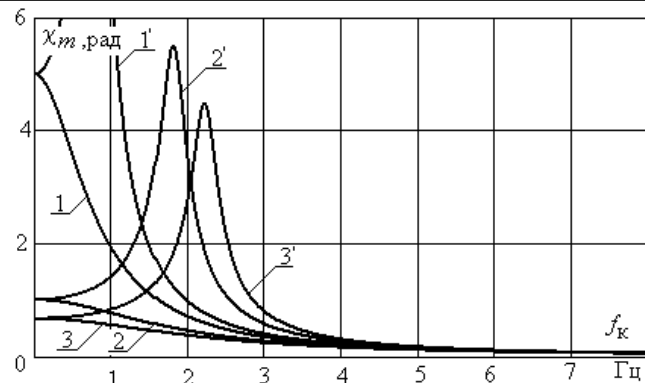
Здесь  $N_1$ ,  $N_2$  – электромагнитные составляющие пускового усилия.

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  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $f_0$  и  $f_{\text{ос}}$  зависимостей от управляющих сигналов.

В качестве примера на рис. 1 представлены амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения для различных значений глубины обратной связи при отсутствии позиционной нагрузки ( $C_{\text{мех}} = 0$ ). Как видно, отрицательная обратная связь (кривые 1–3) приводит к уменьшению амплитуды колебаний, в то время как положительная (кривые 1'–3') – позволяет формировать резонансный режим работы при условии  $f_{\text{ос}} = L_{\text{мех}} \Omega^2$ . Кроме того, введение положительной обратной связи позволяет стабилизировать положение нейтрали колебаний относительно ее нулевого значения.

Если позиционная нагрузка присутствует ( $C_{\text{мех}} \neq 0$ ), то резонансный режим работы электропривода колебательного движения может наблюдаться как при положительной, так и отрицательной обратной связи. Так, введение отрицательной связи по положению будет смещать резонансный пик и, соответственно, собственную частоту электромеханической колебательной системы вправо от частоты  $\Omega = \sqrt{C_{\text{мех}}/L_{\text{мех}}}$ , а положительная – влево. При резонансе, независимо от величины демпфирующей нагрузки, амплитуда колебаний максимальна.

Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики электропривода колебательного движения при отрицательной обратной связи по положению  $f_{oc}$ : 1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 0,75 о.е. и положительной 1' – 0,1; 2' – 0,5; 3' – 0,75 о.е. при  $C_{мех} = 0$



Если соответствующим образом подобрать зависимость между  $f_{oc}$  и частотой колебаний  $\Omega$ , то можно регулировать собственную частоту и амплитуду колебаний в достаточно широких пределах, поддерживая тем самым энергетически выгодный резонансный режим работы. Согласно выражениям (3), (4) это условие выполняется при

$$C_{мех} - U_{m3} \left[ U_{m1} \frac{\mu_0 f_1}{\mu_1 + \mu_2 f_1^2 + \mu_3 f_1^4} \right] - L_{мех} \Omega^2 = 0,$$

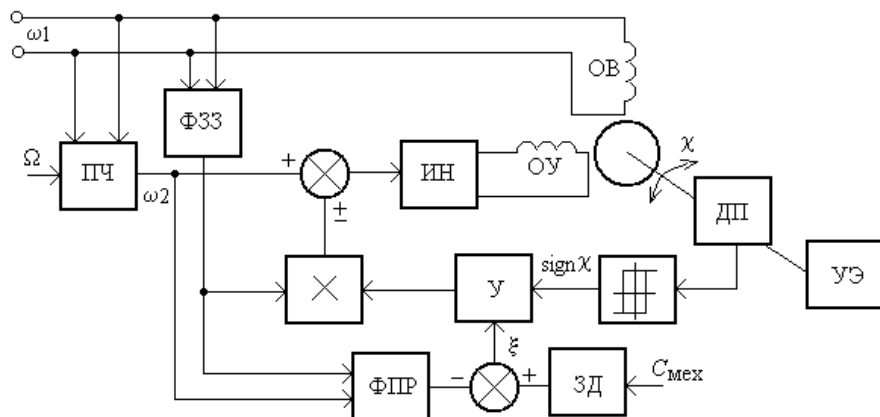
а сам алгоритм изменения амплитуды напряжения обратной связи при варьировании частотой колебания можно записать:

$$U_{m3} = \frac{C_{мех} - L_{мех} \Omega^2}{\xi}, \tag{5}$$

где  $\xi = U_{m1} \mu_0 f_1 / (\mu_1 + \mu_2 f_1 + \mu_3 f_1)$ .

На рис. 2 представлена функциональная схема электропривода колебательного движения, построенная по принципу синхронизации с сетью [4] и реализующая комбинированный способ управления собственной частотой электромеханической системы.

Рис. 2. Функциональная схема электропривода колебательного движения с регулируемой собственной частотой



На схеме отображены: преобразователь частоты (ПЧ); фазосдвигающее звено (ФЗЗ); два сумматора; умножитель напряжений; задатчик упругости (ЗД); функциональный преобразователь (ФПР); усилитель с регулируемым коэффициентом передачи (У); инвертор напряжения (ИН); релейный элемент; датчик положения (ДП) и упругий элемент (УЭ).

Фазосдвигающее звено сдвигает напряжение частоты  $f_1$  по фазе на  $90^\circ$ , формируя вращательную составляющую электромагнитного усилия. ФПР совмещает в себе две функции: преобразование разности частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  в  $n$ -разрядный двоичный код; преобразование кода в напряжение управления усилителем (У) в соответствии с алгоритмом (5). 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. В случае наличия упругого элемента (УЭ) задатчиком (ЗД) задается значение его жесткости.

На рис. 3 представлены амплитудно-частотные характеристики координаты подвижного элемента двигателя при наличии обратной связи по положению (1) и без неё (2).

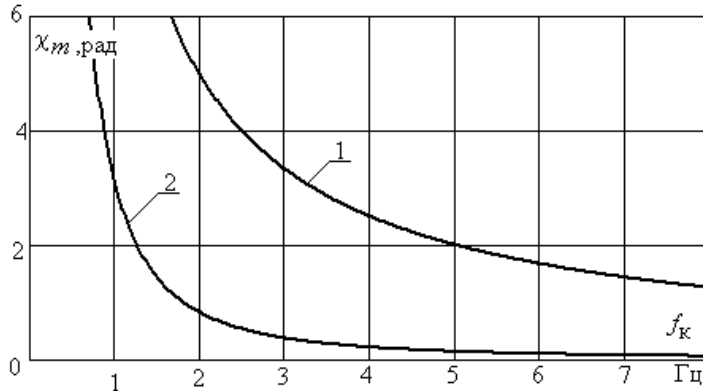


Рис. 3. Временные зависимости изменения координаты подвижного элемента двигателя при наличии обратной связи по положению (1) и без обратной связи по положению (2)

Как видно из рис. 3, амплитуда колебаний подвижного элемента привода при введении обратной связи по положению возрастает на 20%. При этом также возрастут значения скорости и колебательного электромагнитного усилия.

Сравнить эффективность работы электропривода колебательного движения при наличии обратной связи по положению и без нее можно на основании энергетического фактора [5]. Данный показатель выступает как критерий комплексной оценки эффективности работы электромеханического преобразователя энергии, учитывающий как качественную сторону процесса (коэффициент мощности), так и количественную (КПД). Для электропривода колебательного движения его можно рассчитать следующим образом:

$$E = K_M \eta = \frac{M_{\text{пуск}} \chi_m \Omega}{S_{\text{дв}}}, \quad (6)$$

где  $K_M$  — коэффициент мощности;  $\eta$  — коэффициент полезного действия;  $S_{\text{дв}}$  — условно потребляемая полная мощность.

Здесь числитель выражения (6) определяет полную выходную колебательную мощность, а условно потребляемая полная мощность содержит как активную и реактивную составляющие мощности, так и мощность искажения.

Ниже в таблице представлен сравнительный анализ результатов расчета энергетического фактора  $E$ , иллюстрирующий значительное возрастание его при регулировании частоты колебаний и поддержании резонансного режима работы КЭП за счет введения положительной обратной связи по положению.

Результаты расчета энергетического фактора КЭП

Энергетический фактор $E$ , о.е.	Обратная связь	Частота колебаний $f_k$ , Гц							
		1	2	3	4	5	6	7	8
	Есть		0,42	0,24	0,14	0,09	0,05	0,03	0,02
Нет		0,24	0,09	0,03	0,02	0,015	0,01	0,009	0,008

Полученные результаты позволяют сформулировать выводы по работе:

1. Рассмотренный метод регулирования собственной частоты может быть положен в основу создания электроприводов колебательного движения с амплитудно-частотной характеристикой, резонансный пик которой имеет заданную величину в требуемом диапазоне частот колебаний.

2. Введение фиктивной позиционной нагрузки за счет положительной обратной связи по положению позволяет стабилизировать положение нейтрали колебаний, уход которой крайне нежелателен, а в иных случаях и вообще недопустим для ряда технологических процессов.

3. Наличие составляющей позиционной нагрузки позволяет формировать резонансный режим работы КЭП как при положительной, так и отрицательной обратной связи по положению.

#### Литература

1. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
2. Генкин М.Д., Русаков А.М., Яблонский В.В. Электродинамические вибраторы. — М.: Машиностроение, 1975. — 230 с.

3. 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.
4. Патент 2028026 РФ, МПК Н 02 Р 7/62. Электропривод колебательного движения / А.В. Аристов, А.А. Тимофеев, С.В. Шумар (РФ). – № 4903155/07; заявл. 18.01.91; опубл. 27.01.95. Бюл. № 3. – 4 с.
5. Свечарник Д.В. Электромеханические преобразователи видов движения // Электричество. – 1988. – № 6. – С. 27–38.

---

**Аристов Анатолий Владимирович**

Д-р техн. наук, профессор каф. электропривода и электрооборудования энергетического института ТПУ

Тел.: (382-2) 56-32-55

Эл. почта: Parist@sibmail.com

Aristov A.V.

**Oscillatory electric drive with variable eigenfrequency**

The functional oscillatory electric drive circuit and algorithms have been shown, which allow to vary eigenfrequency to maintain the resonant mode of operation and stabilization of oscillatory parameters. The analysis of energy factor has been conducted in presence and absence of the position feedback.

**Keywords:** oscillatory electric drive, geometric neutral position, feedback, resonant mode, energy factor.

---