

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глебов И.А., Кашарский Э.Г., Рутберг Ф.Г. Синхронные генераторы в электрофизических установках. — Л.: Наука, 1977. — 197 с.
2. Глухих В.А. Мощные энергетические комплексы современных электрофизических установок // Импульсные источники энергии: Тез. докл. 3 Всес. конф. — М.: ЦНИИатоминформ, 1989. — С. 169—170.
3. Mark H. Electromagnetic Launch Technology: The Promise and Problems // IEEE Transactions on Magnetic. — 1990. — Vol. 25, № 1. — P. 17—19.
4. Горбачев Г.Н. Источники питания генератора озона // Электротехника. — 1993. — № 11. — С. 63—65.
5. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Дисконный индукторный генератор // Электромеханика. — 2000. — № 4. — С. 27—31.
6. Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Математическое моделирование индукторного генератора дискового типа // Электричество. — 2001. — № 11. — С. 30—35.
7. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. — М.: Высшая школа, 1973. — 752 с.
8. Chuchalin A.I., Muravlyov I.O., Safyannikov I.A. Heating and cooling of disk inductor generator // VI International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates, and Young Scientists, Modern techniques and technology, MTT'2000, February 28 — March 3, 2000, TPU, Tomsk, Russia, 2000. — P. 170—172.
9. Chuchalin A.I., Muravlyov I.O., Safyannikov I.A., Rossamakhin I.N. Energetic parameters of inductor generator // The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, KORUS'99, Abstracts, June, 20—25, 1999 at Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, 1999. — Vol. 2. — P. 807.

УДК 621.34

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

А.В. Аристов

Томский политехнический университет
E-mail: avv@ido.tpu.edu.ru

Представлены результаты исследований колебательных комплексов на основе электрических машин углового и линейного движения. Основное внимание уделено машинам двойного питания, работающим непосредственно в режиме вынужденных колебаний. Проведен анализ рабочих частотных, регулировочных и механических характеристик данного класса электроприводов, представлены новые алгоритмы управления, обеспечивающие резонансный режим работы.

В последнее время все большее распространение приобретают безредукторные колебательные электроприводы (КЭП), построенные на базе практически всех типов серийно выпускаемых электрических машин, работающих непосредственно в режиме периодического движения. Это обусловлено рядом таких преимуществ, как: исключение потерь энергии в дополнительных механических звеньях преобразования движения, снижение мощности управления и повышения надежности всей системы в целом. Простота и удобство сопряжения электрических машин с электронными узлами управления, возможность плавно и на ходу регулировать параметры механических колебаний при обеспечении высокой равномерности движения, широкий диапазон воспроизведения колебаний по частоте, амплитуде и форме — все это предопределяет бурное развитие и широкое применение КЭП на их основе [1].

Как правило, для создания колебательного режима работы используются те же принципы управления, что и в следящих системах, а именно, применение различных видов модуляции напряжений (токов) при питании обмоток исполнительных двигателей. Различают три основных вида модуляции: линейно-фазовую, балансно-амплитудную и балансно-частотную [2].

Все виды модуляции, положенные в основу возбуждения колебаний, имеет определяющее значение при построении конкретных специализированных КЭП. Так, одновременно с преимуществами следящих систем по управляемости, такие способы возбуждения режима мягкого периодического реверса как амплитудный и частотный сохраняют и их основной недостаток — необходимость применения специальных задающих устройств периодических сигналов. С точки зрения режима работы электромеханического преобразователя, более выгодна в энергетическом отношении балансно-частотная модуляция питающих токов. Но, с другой стороны, управление электрической машиной требует двух регулируемых по частоте мощных генераторов тока, работающих отдельно на каждую из фаз обмотки исполнительного двигателя и управляемых от отдельных задающих устройств. Подключение одной из фаз двигателя непосредственно к сети в данном случае невозможно. Все это, как известно, приводит к значительному увеличению мощности управления. В итоге сложность и трудность создания управляемых по частоте генераторов с малой девиацией частоты сдерживает распространение КЭП с частотно-токовым управлением.

Наиболее перспективным следует признать использование линейно-фазовой модуляции, кото-

рая может быть реализована, например, за счет разночастотного питания фаз исполнительного двигателя; при непрерывном изменении фазового сдвига между питающими напряжениями; путем питания одной из фаз постоянным, а других – переменным токами [2].

Фазовый способ возбуждения колебательного режима работы позволяет получить диапазоны плавного регулирования по амплитуде, частоте и положению нейтрали колебаний до четырех порядков, дает возможность создавать колебания без специальных задающих устройств периодических сигналов.

Одним из направлений повышения энергетических и динамических показателей колебательных электроприводов является построение их на основе машины двойного питания (МДП), когда одноименные статорные и роторные обмотки исполнительного двигателя соединены попарно параллельно [3]. При этом существенно возрастает КПД и мощность привода за счет компенсации инерционности нагрузки и формирования в колебательном двигателе синхронных свойств. В синхронном режиме мгновенные значения скорости изменения колебательного электромагнитного поля и подвижного элемента двигателя совпадают, скольжение отсутствует, что приводит к снижению потерь на нагрев, улучшению динамических показателей колебательной системы в целом.

Основные свойства колебательной машины двойного питания определяются рядом ее характеристик. В первую очередь к ним относятся амплитудно-фазочастотные кинематические (силовые), регулировочные и механические характеристики, которые могут быть получены для установившегося режима работы МДП на основании решения уравнения движения.

Однако выражения эти весьма громоздки и требуют при своем анализе большого объема вычислений, что делает затруднительным применение их для дальнейшего получения практических выводов. Поэтому, с целью наглядности и простоты исследования влияния параметров электрической машины, нагрузки и источников питания на рабочие характеристики МДП следует использовать ряд упрощающих допущений, в частности:

- рассматривать установившиеся режимы работы МДП, когда амплитуда колебаний подвижного элемента не превышает половины геометрического базового размера положения ротора (бегуна) обобщенного электродвигателя;
- если закон колебания подвижного элемента электродвигателя не имеет определяющего значения, то находить рабочие характеристики для первой гармоники колебаний;
- считать параметры нагрузки в процессе работы постоянными и независимыми от времени;
- при необходимости определять отклонение выходных параметров относительными или среднеквадратичными величинами.

С учетом вышесказанного, первую гармоническую составляющую обобщенного колебательного электромагнитного усилия можно представить, как

$$M_{эм,1}(t) = M_m \cdot \sin(\Omega t + \varphi),$$

где амплитуда M_m и фаза φ определяются выражениями

$$M_m = \left\{ \begin{aligned} & f_{m0}^2 + f_{m1}^2 + f_{m2}^2 + \frac{2f_{m1}}{[1 + Z(\Omega)]^{0,5}} \times \\ & \times [f_{m0} + f_{m2} \cdot Z(\Omega)] \end{aligned} \right\}^{0,5};$$

$$\varphi = \arctg \frac{f_{m1} \sin \psi + f_{m2} \sin \alpha + f_{m0} \cos \alpha}{f_{m1} \cos \psi + f_{m2} \cos \alpha - f_{m0} \sin \alpha}.$$

Здесь, амплитуды первых гармонических составляющих эквивалентных пускового f_{m1} , демпфирующего f_{m0} и позиционного f_{m2} усилий, а также комплексный коэффициент нагрузки $Z(\Omega)$ и фаза Ψ рассчитываются для колебательного режима работы на частоте Ω по выражениям:

$$f_{m1} = \left[M_1^2 + M_3^2 \cdot J_0^2(\chi_m) + M_3^2 \cdot J_2^2(\chi_m) + 2M_1 \cdot M_3 \cdot J_0(\chi_m) \cos(\psi_1 - \psi_3) - 2M_1 M_3 J_2(\chi_m) \cos(\psi_1 + \psi_3 - 2\alpha) - 2M_3^2 \cdot J_0(\chi_m) \cdot J_2(\chi_m) \cos 2(\psi_3 - \alpha) \right]^{0,5};$$

$$f_{m0} = \Omega \cdot \chi_m \{ N_1 + N_5 [J_0(\chi_m) + J_2(\chi_m)] \};$$

$$f_{m2} = 2M_5 \cdot J_1(\chi_m) \cdot \chi_m;$$

$$M_1 \sin \psi_1 + M_3 J_0(\chi_m) \sin \psi_3 - \arctg \frac{-M_3 J_2(\chi_m) \sin(2\alpha - \psi_3)}{M_1 \cos \psi_1 + M_3 J_0(\chi_m) \cos \psi_3 - M_3 J_2(\chi_m) \cos(2\alpha - \psi_3)};$$

$$Z(\Omega) = (C_{мех}^{-1} + M_5 - L_{мех} \Omega^2) / (R_{мех} - N_1 - N_5) \Omega \quad (2)$$

В представленных формулах: $J_0(\chi_m)$, $J_1(\chi_m)$, $J_2(\chi_m)$ – функции Бесселя первого рода; χ_m , Ω , α – амплитуда, частота и начальная фаза установившегося закона колебаний; M_i – гармонические составляющие колебательного электромагнитного усилия; $L_{мех}$, $R_{мех}$, $C_{мех}^{-1}$ – коэффициенты инерционного, демпфирующего и позиционного усилий нагрузки.

Соотношения (1) и (2) являются базовыми и описывают совместно с законом движения координаты подвижного элемента МДП искомые амплитудно-фазочастотные кинематические $\chi_m(\Omega)$, $\alpha(\Omega)$, $\omega_m(\Omega)$ и силовые $M_m(\Omega)$, $\varphi(\Omega)$ характеристики, а также механические амплитудные ($\Omega = var$) и мгновенные ($t = var$) характеристики по координате $\chi_m(M_m)$; $\chi(M_{эм})$; $\omega(M_m)$; $\omega(M_{эм})$ для различных видов нагрузки. Они определяют и всю гамму регулировочных характеристик $\chi_m(\alpha, \Omega, \Psi_i)$, $\alpha(\alpha, \Omega, \Psi_i)$, $\omega_m(\alpha, \Omega, \Psi_i)$, $\delta(\alpha, \Omega, \Psi_i)$, $M_m(\alpha, \Omega, \Psi_i)$,

$\varphi(\alpha, \Omega, \Psi_i)$ при подстановке в них зависимостей f_{m0}, f_{m1} и f_{m2} от функций регулирования.

В виду того, что представленные соотношения являются трансцендентными уравнениями (первая гармоническая составляющая колебательного электромагнитного усилия выражена через амплитуду и фазу выходных колебаний), то методика определения рабочих характеристик сводится, по существу, к построению для заданных параметров электрической машины, нагрузки и функций регулирования семейства зависимостей

$$\begin{cases} M_m = f_1(\chi_m, \alpha); \\ \varphi = f_2(\chi_m, \alpha). \end{cases}$$

Методом последовательных приближений, в качестве первого из которых целесообразно выбирать первое приближение закона движения, рассчитанное согласно методики [4], по графикам производят доопределение значений M_m и φ , которые являются исходными данными для расчета новых значений χ_m и α

$$\chi_m = \frac{M_m}{\Omega(R_{\text{мех}} - f_{m0}) \cdot [1 + Z^2(\Omega)]^{0,5}};$$

$$\alpha = \varphi - \text{arctg} \frac{1}{Z(\Omega)}.$$

Затем производят новое доопределение, и расчет повторяют до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность результатов расчета.

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты совместного решения уравнений (1), (2) с помощью ПЭВМ при нагрузке $L_{\text{мех}} = 18,7$ о.е.; $R_{\text{мех}} = 2,0$ о.е.; $C_{\text{мех}}^{-1} = 0$ на частоте $\Omega = 0,1$ о.е. для различных значений начальной фазы α закона движения подвижного элемента двигателя.

Установлено, что при принятых допущениях вместо выражений (2) можно использовать приближенные соотношения, определяющие составляющие колебательного электромагнитного усилия

как

$$\begin{aligned} \bar{f}_{m0} &= N_1 + N_5; \quad \bar{f}_{m1} = \sqrt{M_1^2 + M_3^2}; \\ \bar{f}_{m2} &= M_5. \end{aligned}$$

Их максимальные отклонения от f_{m0}, f_{m1} и f_{m2} при $\chi_m \leq 1$ не превышают 12 %, что позволяет значительно облегчить анализ рабочих характеристик и дает вполне приемлемые для большинства инженерных расчетов результаты. Для первого приближения рабочие характеристики МДП представлены табл. 1, 2.

В качестве примера на рис. 2 приведены амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ) МДП, разработанной на базе серийного электродвигателя 4АК160S8У3, входящей в состав системы воспроизведения асимметричных колебаний вибротранспортной технологической установкой горизонтального снаряжения трубчатых изделий АЭС. Анализ их показывает, что при малом механическом демпфировании ($R_{\text{мех}} < 1$) на амплитудно-частотной характеристике (кривая 1) отчетливо наблюдается резонансный максимум, определяемый соотношением между электромагнитным позиционным усилием f_{m2} , развиваемым МДП и величиной инерционной нагрузки $L_{\text{мех}}$. Согласно принципа электромеханической аналогии, возрастающий участок АЧХ соответствует емкостному характеру нагрузки ($Z(\Omega) > 0$), а падающий – индуктивному ($Z(\Omega) < 0$). Наличие электромеханического резонанса приводит к изменению и обобщенного колебательного электромагнитного усилия. Оно также возрастает с увеличением частоты колебаний Ω , достигая своего максимального значения при $Z(\Omega) = 0$, после чего уменьшается. Кривые 2 на рис. 2 иллюстрируют включение МДП в режим асинхронного двигателя. Последний и предопределяет в конечном итоге характер АФЧХ. Однако следует заметить, что в режиме асинхронного

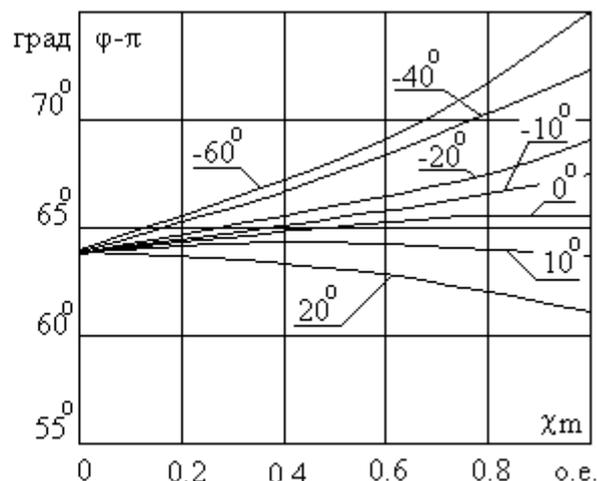
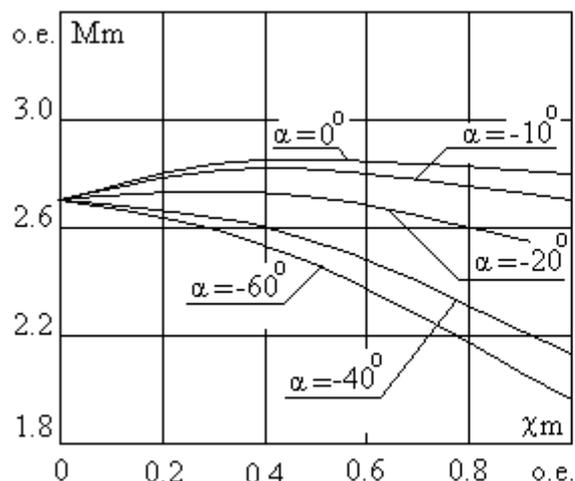


Рис. 1. Зависимости амплитуды и фазы первой гармонической составляющей обобщенного колебательного электромагнитного усилия от амплитуды и фазы колебания подвижного элемента МДП

Таблица 1. Рабочие частотные характеристики МДП при периодическом движении ротора (бегуна) для первого приближения

Наименование параметра		Виды нагрузок	
		$L_{\text{мех}} \neq 0; C_{\text{мех}}^{-1} \neq 0; R_{\text{мех}} \neq 0;$	
Обобщенная координата положения $\chi(t)$	Амплитуда χ_m	$\frac{\bar{f}_{m1}}{[(C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_{m2} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0})^2 \Omega^2]^{0,5}}$	$C_{\text{мех}}^{-1} = L_{\text{мех}} \Omega^2 - \bar{f}_{m2}$
	Фаза α	$\arctg \frac{\sin \psi (C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_2 - L_{\text{мех}} \Omega^2) - \cos \psi (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega}{\cos \psi (C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_2 - L_{\text{мех}} \Omega^2) + \sin \psi (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega}$	$\psi - \frac{\pi}{2}$
Обобщенная скорость $\omega(t)$	Амплитуда ω_m	$\frac{\Omega \bar{f}_{m1}}{[(C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_{m2} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0})^2 \Omega^2]^{0,5}}$	$\frac{\bar{f}_{m1}}{[R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}]}$
	Фаза δ	$\arctg \frac{\sin \psi (C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_2 - L_{\text{мех}} \Omega^2) - \cos \psi (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega}{\cos \psi (C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_2 - L_{\text{мех}} \Omega^2) + \sin \psi (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega} + \frac{\pi}{2}$	ψ
Обобщенное электромагнитное усилие $M_{\text{м}}^{\text{м}}(t)$	Амплитуда M_m	$\bar{f}_{m1} \left[\frac{(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + R_{\text{мех}} \Omega^2}{(C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_{m2} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0})^2 \Omega^2} \right]^{0,5}$	$\bar{f}_{m1} \frac{(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + R_{\text{мех}} \Omega^2}{(R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega}$
	Фаза φ	$\psi + \arctg \frac{\Omega [\bar{f}_{m0} (C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2) + \bar{f}_{m2} R_{\text{мех}}]}{(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2) (C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{f}_{m2} - L_{\text{мех}} \Omega^2) + R_{\text{мех}} (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega^2}$	$\arctg \frac{\bar{f}_{m0} (C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2) \bar{f}_{m2} R_{\text{мех}}}{R_{\text{мех}} (R_{\text{мех}} - \bar{f}_{m0}) \Omega} + \psi$

Таблица 2. Механические характеристики МДП по координате положения и скорости при периодическом движении ротора (бегуна)

Наименование		Виды нагрузок	
		$L_{\text{мех}} \neq 0; C_{\text{мех}}^{-1} \neq 0; R_{\text{мех}} \neq 0$	
Амплитудные	$\chi_m(M_m)$	$M_m [(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2 \Omega^2]^{-0,5}$	$\frac{M_m}{R_{\text{мех}} \Omega}$
	$\omega_m(M_m)$	$M_m \Omega [(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2 \Omega^2]^{-0,5}$	$\frac{M_m}{R_{\text{мех}}}$
Мгновенные (ЭЛЛИПС)	$\chi(M_{\text{ЭМ1}})$	$\frac{\chi_m^2}{\chi_m^2} [1 + Z_{\text{мех}}^2(\Omega)] + \frac{M_{\text{ЭМ1}}^2}{M_m^2} [1 + Z_{\text{мех}}^2(\Omega)] - 2 \frac{M_{\text{ЭМ1}} \chi_m}{M_m \chi_m} Z_{\text{мех}}(\Omega) [1 + Z_{\text{мех}}^2(\Omega)]^{0,5} = 1$	$\chi_m^2 \frac{M_{\text{ЭМ1}}^2}{M_m^2} + \frac{M_{\text{ЭМ1}}^2}{M_m^2} = 1$
	$\omega(M_{\text{ЭМ1}})$	$\frac{\omega_m^2}{\omega_m^2} [1 + \frac{1}{Z_{\text{мех}}^2(\Omega)}] + \frac{M_{\text{ЭМ1}}^2}{M_m^2} [1 + \frac{1}{Z_{\text{мех}}^2(\Omega)}] - 2 \frac{M_{\text{ЭМ1}} \omega_m}{M_m \omega_m} \frac{1}{Z_{\text{мех}}^2(\Omega)} [1 + Z_{\text{мех}}^2(\Omega)]^{0,5} = 1$	–

Таблица 3. Условия обеспечения резонансного режима работы МДП при регулировании частоты колебаний Ω при $L_{\text{мех}} \neq 0; C_{\text{мех}}^{-1} = 0$

$\Omega = \left[\frac{C_{\text{мех}}^{-1} + f_2}{L_{\text{мех}}} \right]^{0,5}$	$\frac{\Omega}{\alpha} = \text{const}$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$	$\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha$ $\alpha_2 = \alpha_4 = 1$	$\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$ $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$	$\frac{\Omega}{\sqrt{\alpha}} = \text{const}$ $\frac{\Omega}{\sqrt{\alpha}} = \left[\frac{0,5(\rho_{18} - \rho_{17})}{L_{\text{мех}}} \right]^{0,5}$
$\Omega = \left[\frac{C_{\text{мех}}^{-1} + f_2}{L_{\text{мех}}} \right]^{0,5}$	$\frac{\Omega}{\alpha} = \left[\frac{0,5(\rho_{18} - \rho_{17})}{L_{\text{мех}}} \right]^{0,5}$	$\Omega = \left[\frac{0,5(\alpha \rho_{18} - \rho_{17})}{L_{\text{мех}}} \right]^{0,5}$	$\Omega = \left[\frac{0,5(\alpha^2 \rho_{18} - \rho_{17})}{L_{\text{мех}}} \right]^{0,5}$		

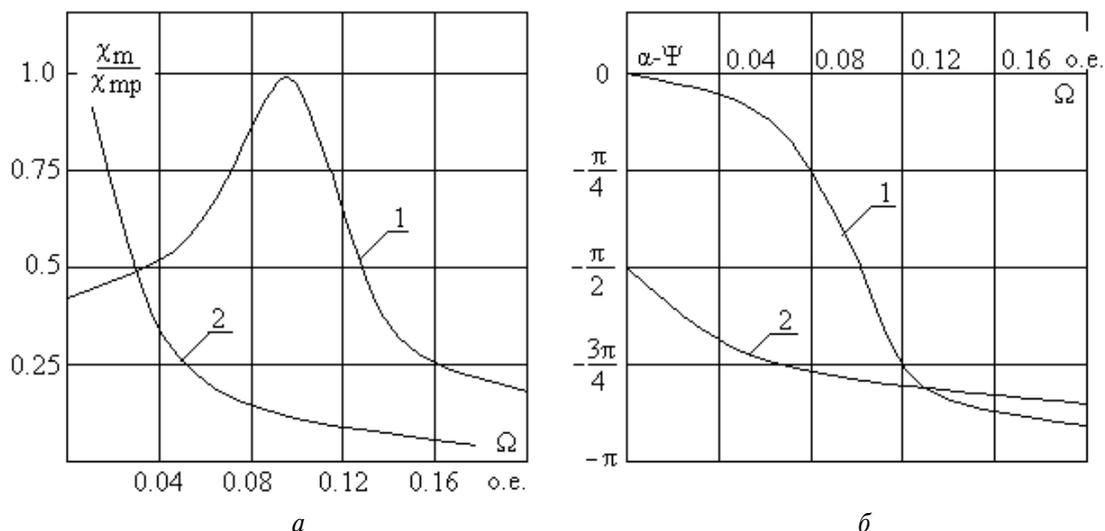


Рис. 2. Амплитудно-фазочастотные кинематические характеристики МДП при $L_{мех}=18,73$ о.е.; $R_{мех}=2,0$ о.е.; $C_{мех}^{-1}=0$

двигателя амплитудно-частотная силовая характеристика отличается от известной [1], так как учитывает механическое демпфирование нагрузки. В частности она имеет хотя и слабый, но падающий характер. Этот факт позволяет заключить о возможности синтезировать для некоторого частотного диапазона колебательный электропривод, инвариантный по усилию к частоте колебаний при $f_{m0} = 0$.

Амплитудные механические характеристики представляют собой не замкнутые кривые, а относительные и абсолютные мгновенные (рис. 3) – эллипсы. Независимо от режима работы МДП они занимают четыре квадранта и повернуты относительно начала координат соответственно на угол $\pi/4$ и угол

$$\alpha_{эл} = 0,5 \arctg \frac{4M_m \cdot \omega_m}{M_m^2 - \omega_m^2} \cdot \sqrt{1 + Z_{мех}^2} (\Omega).$$

В отличие от амплитудных механических характеристик и абсолютных мгновенных – относительные мгновенные механические характеристики представляют собой нагрузочные линии при колебательном режиме работы МДП и не связаны с ее параметрами.

Регулировочные характеристики наряду с механическими являются основными характеристиками исполнительных двигателей, работающих в режиме периодического реверса. Одним из главных требований, предъявляемым к ним, является линейность – прямая пропорциональная зависимость выходных параметров МДП от функций регулирования. Однако, как правило, это требование не выполняется. В первую очередь это связано с тем, что составляющие пускового f_{m1} , демпфирующего f_{m0} и позиционного f_{m2} усилий, определяющие в конечном итоге характер изменения выходных параметров МДП, являются нелинейными функциями от

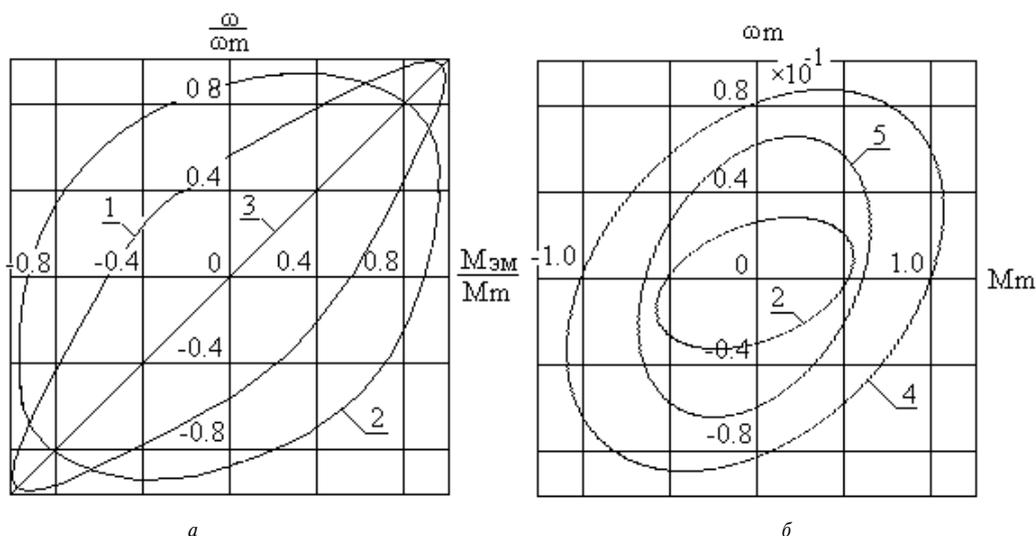


Рис. 3. Мгновенные относительные а) и абсолютные б) механические характеристики МДП по скорости при $L_{мех}=123$ о.е.; $R_{мех}=3,19$ о.е.; $C_{мех}^{-1}=0$; $\Omega = 0,02$ (1), $\Omega = 0,18$ (2), $\Omega = 0,1$ (3), $\Omega = 0,1$ (4), $\Omega = 0,08$ (5) и $C_{мех}^{-1}=1,23$ о.е.

коэффициента сигнала управления α_i . Причем нелинейность составляющих колебательного электромагнитного усилия зависит существенным образом от того, как и по каким из обмоток исполнительного двигателя производится регулирование. Во-вторых, выходные параметры колебательного электродвигателя, в свою очередь, сами являются нелинейными функциями f_{m0} и f_{m2} . Проведенный анализ способов регулирования показал возможность пропорционального регулирования некоторых из составляющих колебательного электромагнитного момента. В частности, при симметричном регулировании по одноименным обмоткам первичного и вторичного элементов обеспечивается пропорциональное регулирование амплитуды эквивалентного пускового усилия МДП, а при регу-

лировании только по обмоткам ротора – составляющей электромагнитного позиционного усилия. Однако, несмотря на возможность реализации прямо-пропорционального регулирования составляющих колебательного момента линейность для $\chi_m(\alpha_i)$ не обеспечивается.

Возможность варьирования позиционным колебательным электромагнитным моментом позволяет регулировать собственную частоту колебаний КЭП, а, следовательно, поддерживать в заданном частотном диапазоне работы МДП энергетически выгодный резонансный режим работы. В связи с этим, в табл. 3 представлены алгоритмы обеспечения резонансного режима работы МДП ($Z(\Omega)=0$) при изменениях частоты колебаний Ω для различных способов регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. — Томск: ИПФ ТПУ, 2000. — 176 с.
2. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
3. А. с. 1307530 СССР. Электропривод колебательного движения / А.В. Аристов и др. // Б.И. 1987. — № 16.
4. Аристов А.В., Аристов В.В. Исследование уравнения низкочастотного колебательного движения машины двойного питания // Электротехника. — 1994. — № 11. — С. 28–31.

УДК 621.313

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВодОВ

Р.Ф. Бекишев, С.И. Качин, Ю.С. Боровиков

Томский политехнический университет
E-mail: borovikov@tpu.ru

Статья носит обзорный характер и посвящена основным этапам развития коммутационной научной школы Томского политехнического университета за период с 1965 по 2003 годы. В работе рассмотрены вопросы выполнения контактных элементов электрических машин из углеродных материалов. Уделено немаловажное место исследованиям, направленным на расширение функциональных возможностей применяемых конструкций коллекторно-щеточных узлов и активных элементов коллекторных машин, а также работам, направленным на обеспечение инженерного корпуса методиками и программами для осуществления оптимального проектирования всего многообразия коллекторных электрических машин. Отмечены работы в области создания диагностических комплексов для оценки состояния устройств скользящего токосъема в различных режимах работы, а также создания специальных методик и расчетных программ для обработки получаемой информации.

Введение

Коллекторные электрические машины (КЭМ) находят все более широкое применение во всех отраслях промышленности, в системах средств связи и в бытовой технике. Обладая известными преимуществами перед электрическими машинами переменного тока, в частности, возможностью плавного и экономичного регулирования частоты вращения, универсальными рабочими характеристиками, коллекторные электродвигатели являются незаменимыми в системах электроприводов.

Широкое использование в машиностроении станков с числовым программным управлением

требует разработки надежных электроприводов с широким регулированием частоты вращения и повышенными крутящими моментами. Для этих целей разработаны и совершенствуются новые модификации коллекторных высокомоментных электродвигателей.

Электродвигатели постоянного тока нашли широкое применение для привода бортовой авиационной и космической аппаратуры, а также в системах специальной техники.

Развитие полупроводниковой электроники и разрабатываемой на ее базе преобразовательной техники привело к созданию бесколлекторных