

УДК 621.313.333

Л.А. Паук, Н.А. Воронина, Д.Ю. Ляпунов

## Специальные режимы работы в безредукторном электроприводе вибростола

Для реализации специальных режимов работы был рассмотрен алгоритм формирования питающих напряжений безредукторного электропривода вибростола. Особенностью рассматриваемого электропривода является машина двойного питания (МДП), которая выступает в роли приводного двигателя вибросистемы. Показано, что в случае с МДП как исполнительного двигателя, работающего в колебательном, колебательно-вращательном и полигармоническом режимах, наилучшие характеристики имеет силовой электропривод с косинусоидально-частотной модуляцией управляющего сигнала. Разработана математическая модель МДП, позволяющая исследовать различные режимы работы виброоборудования. Обоснованы актуальность данного вопроса и его практическая значимость для вибростолов различного назначения. Использована методика оценки влияния параметров нагрузки на динамические показатели исполнительного двигателя. Даны анализ влияния параметров источника питания и нагрузки на динамические показатели исполнительного электродвигателя и некоторые практические рекомендации.

**Ключевые слова:** электропривод вибростолов, силовой привод, колебательно-вращательный режим работы, вибродиагностика, машина двойного питания, динамические показатели.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-122-130

Безредукторный колебательный электропривод всё чаще используется в различных областях, а именно: портативные устройства; медицина; программы подготовки и восстановления спортсменов-олимпийцев; вибрационные косметические аппараты; вибрационная автоматическая сборка деталей, интенсификация физических и химических процессов, добыча нефти и т.д. [1–3, 8].

В табл. 1 приведены основные области применения электроприводов виброустановок различного назначения и требования, предъявляемые к ним. В виброустановках, применяемых в сельском хозяйстве, горной и химической промышленности (табл. 1), достаточно регулировать только амплитуду и частоту колебаний дискретно. К виброустановкам остальных отраслей народного хозяйства предъявляются повышенные требования к управляемости приводов. Для полного обеспечения технологического процесса они должны регулироваться плавно в процессе работы, обеспечивая требуемые амплитуду, частоту, фазу и гармонический состав питающих токов и напряжений (см. табл. 1).

Широко и разнообразно используются механические колебания в технике измерения, контроля и управления, занимающей амплитудно-частотную область с границами по линейным колебаниям:  $10^{-3} \dots 10^3$  Гц,  $10^{-6} \dots 3$  м,  $2 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^3$  м/с<sup>2</sup> и по углам:  $0,1 \dots 10^3$  Гц,  $10^{-2} \dots 180$  рад,  $0,5 \dots 5 \cdot 10^4$  рад/с<sup>2</sup>.

Данная область применения вибрационных электроприводов отличается необходимостью плавного регулирования всех параметров колебаний с последующей стабилизацией их по амплитуде и частоте с точностью:  $0,5 \dots 10\%$ , по фазе  $2,5 \dots 20^\circ$ . В экспериментальных измерительных установках требуются низкочастотные гармонические колебания ( $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Гц). Здесь применяются пилообразные и гармонические колебания с перемещением нейтрали, а также используются двухкоординатные колебания для получения разнообразных траекторий сканирования.

К вибрационной технике (виброплатформы, вибростолы) предъявляется ряд требований, которые необходимо выполнять неукоснительно, а именно: амплитуда колебаний, их частота, точность и многое другое [2, 4, 5]. При формировании колебаний вибродиагностической платформой можно воспользоваться генератором колебаний на базе МДП, который работает в колебательном, колебательно-вращательном и полигармоническом режимах (рис. 1). Особенностью реализации последнего является то, что обмотки статора запитываются токами одной частоты, а обмотки ротора – токами другой частоты или наоборот [3].

В данной работе предложены способы формирования: колебательного, колебательно-вращательного и полигармонического режимов работы безредукторного электропривода вибростола. В качестве исполнительного двигателя используется МДП при формировании напряжения питания обмоток двигателя различными способами [2, 3, 5–7], которые относятся к специальным режимам.

Функциональная схема электромеханического преобразователя энергии (ЭМПЭ) представлена на рис. 1.

Алгоритмы, разработанные авторами данной статьи можно использовать и для традиционных электроприводов, используемых для технологических процессов в промышленности, где требуется колебательный режим работы [9–11].

### Методика

Для случая машины двойного питания система уравнений Кирхгофа в общем виде, описывающая электромагнитные процессы, протекающие в МДП, представлена в работах [3, 12, 13].

В отличие от обычного жесткого периодического реверса здесь электромагнитный момент при смене направления движения становится бесконечно малым, чем обеспечивается плавность колебаний. Функции же управления в случае реализации колеба-

ний при амплитудно-фазовой или частотно-токовой модуляции питающих токов (мгновенные временные зависимости источников тока) в общем виде запишем как

$$\begin{aligned} I_{\alpha s}(t) &= v_1 I_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha'); \\ I_{\beta s}(t) &= v_2 I_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta'); \\ I_{\alpha r}(t) &= -v_3 I_{m3} \sin(\omega_3 t + \gamma) \cos(\theta) \pm I_{m4} \sin(\omega_4 t + \phi) \sin(\theta); \\ I_{\beta r}(t) &= v_4 I_{m4} \sin(\omega_3 t + \phi) \cos(\theta) \pm \\ &\pm I_{m3} \sin(\omega_4 t + \gamma) \sin(\theta). \end{aligned} \quad (1)$$

Выражения для функций управления при питании от источника напряжения обмоток статора и ротора машины двойного питания в преобразованных осях  $\alpha, \beta, 0$  в общем виде имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} U_{\alpha s}(t) &= v_1 U_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha'); \\ U_{\beta s}(t) &= v_2 U_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta'); \\ U_{\alpha r}(t) &= v_3 U_{m3} \sin(\omega_3 t + \gamma) \cos(\theta) \pm \\ &\pm v_3 U_{m4} \sin(\omega_4 t + \phi) \sin(\theta); \\ U_{\beta r}(t) &= -v_4 U_{m4} \sin(\omega_3 t + \gamma) \sin(\theta) \pm \\ &\pm v_4 U_{m3} \sin(\omega_4 t + \phi) \cos(\theta). \end{aligned} \quad (2)$$

Таблица 1

## Области применения вибрационных электроприводов и технические требования, предъявляемые к ним

Отрасли производства	Технологическая операция	Параметры линейного и углового режима колебаний				Параметры нагрузки	
		Частота, Гц	Амплитуда, м <sup>-3</sup> ; рад	Ускорение, м/с <sup>2</sup> ; рад/с <sup>2</sup>	Закон	Масса, момент инерции, кг; Г·см/с <sup>2</sup>	Мощность привода, кВт
Машиностроение	Виброточение.	1...2·10 <sup>4</sup>	5·10 <sup>-4</sup> ...10	1...10 <sup>4</sup>	Г, ГН	0,1...1	0,5...2
	Виброфрезерование.	10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> ...2·10 <sup>-2</sup>	0,5...10 <sup>4</sup>	Г, ГН	0,1...1	0,5...2
	Виброшлифование.	0,1...50	0,1...180	2...2·10 <sup>3</sup>	ГН	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-3</sup>	0,4...2
	Выбросверление.	50...100	10 <sup>-3</sup> ...0,1	1...40	ГН	0,1...1	0,5...2
	Вибросварка.	10...100	1...10	4...400	ГН	0,5...3	0,2...2
	Виброобкатка.	20...120	0,2...8	10 <sup>2</sup> ...1,5·10 <sup>2</sup>	ГН	0,1...0,5	0,12...1,2
	Виброгалтовка	1...60	0,5...10	0,5...70	Г, ГД	1...10 <sup>2</sup>	0,5...20
Строительство	Виброуплотнение.	50...350	10 <sup>-2</sup> ...1	10...10 <sup>3</sup>	ПГ	–	0,6...11
	Вибропогружение.	5...40	1...15	1...10 <sup>3</sup>	С	–	10...100
	Вибродробление	50...300	0,1...5	10...10 <sup>3</sup>	С	1...10 <sup>2</sup>	0,4...2
Горная промышленность	Вибровыпуск руды.	8...200	0,5...10	50...2·10 <sup>3</sup>	С	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	2...50
	Отделение руды.	15...100	2...40	2...2·10 <sup>3</sup>	С	–	3·10 <sup>-2</sup> ...1,5
	Вибробурение	5...47	1...5	1,5...150	С	–	1...15
Сельское хозяйство	Вибросортировка.	10...50	1...5	5...500	ГД	10...10 <sup>2</sup>	1...12
	Виброобмолот.	25...50	5...10	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>4</sup>	С	10...10 <sup>2</sup>	1...15
	Вибровспашка.	10...20	10...25	40...400	С	10...10 <sup>2</sup>	1...10
	Виброуборка плодов	3...10	5...25	2...100	С	–	1...8
Химическая промышленность	Вибросмещение.	3...25	10...90	4...2·10 <sup>3</sup>	С	0,1...10 <sup>2</sup>	0,2...5
	Виброизмельчение.	25...100	0,2...5	5...500	С	0,1...10 <sup>2</sup>	0,1...1
	Вибросушка.	25...100	0,5...3	15...300	С	0,1...10 <sup>2</sup>	0,1...1
	Виброочистка газов	25...50	1...5	25...10 <sup>4</sup>	С	–	0,1...0,8
Техника измерения, контроля и управления	Виброориентирование.	0,1...10	1...180	0,5...5·10 <sup>4</sup>	П, Г	10 <sup>-9</sup> ...10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-3</sup> ...0,1
	Вибролинеаризация.	25...100	10 <sup>-2</sup> ...10	1...10 <sup>3</sup>	П	10 <sup>-5</sup> ...10 <sup>-1</sup>	5·10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-1</sup>
	Виброзащита	1...10 <sup>3</sup>	0,1...20	1...10 <sup>3</sup>	Г	0,5...10	0,1...2
Испытательная техника	Калибровочное вибровозбуждение.	10 <sup>-2</sup> ...50	2·10 <sup>-2</sup> ...60	2...2·10 <sup>3</sup>	Г	10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-6</sup>	0,05...0,2
	Силовое возбуждение.	0,1...10 <sup>3</sup>	1,2...10	5...500	Г	–	0,1...10
	Вибропрочность.	5...10 <sup>4</sup>	2·10 <sup>-2</sup> ...20	1...10 <sup>3</sup>	Г	2...200	1...46
	Виброустойчивость.	8...400	5·10 <sup>-2</sup> ...10	50...10 <sup>4</sup>	Г	–	0,2...2
	Качение по частоте.	5...10 <sup>4</sup>	10 <sup>-3</sup> ...10	50...500	Г	10 <sup>-7</sup> ...10 <sup>-4</sup>	1...46
	Моделирование вибронагрузок	0,5...10 <sup>3</sup>	0,1...10	10...500	Г	2...200	0,2...2
		25...100	0,1...2	2...800	Г	1...20	0,1...2
Бытовая техника, реклама	Вибропривод	0,5...5	1...5	2·10 <sup>-2</sup> ...5	ПГ	10 <sup>-4</sup> ...10 <sup>-2</sup>	0,5...4
Портативные информационные терминалы	Линейный вибратор	0,3...300	1,5·10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-1</sup>	15...10 <sup>2</sup>	Г	10 <sup>-3</sup> ...10 <sup>-1</sup>	0,05...0,6
Нефтегазовая отрасль	Вибробурение	5...15	2,5·10 <sup>-2</sup> ...10 <sup>-1</sup>	3,8...2·10 <sup>3</sup>	Г	10 <sup>2</sup> ...10 <sup>3</sup>	1...15

*Примечание* Для закона колебаний приняты следующие сокращения: Г – гармонический; ГН – гармонический со смешением нейтралей; ГД – гармонический двухкоординатный; ПГ – полигармонический; П – пилообразный; ПН – пилообразный со смешением нейтралей; С – случайный.

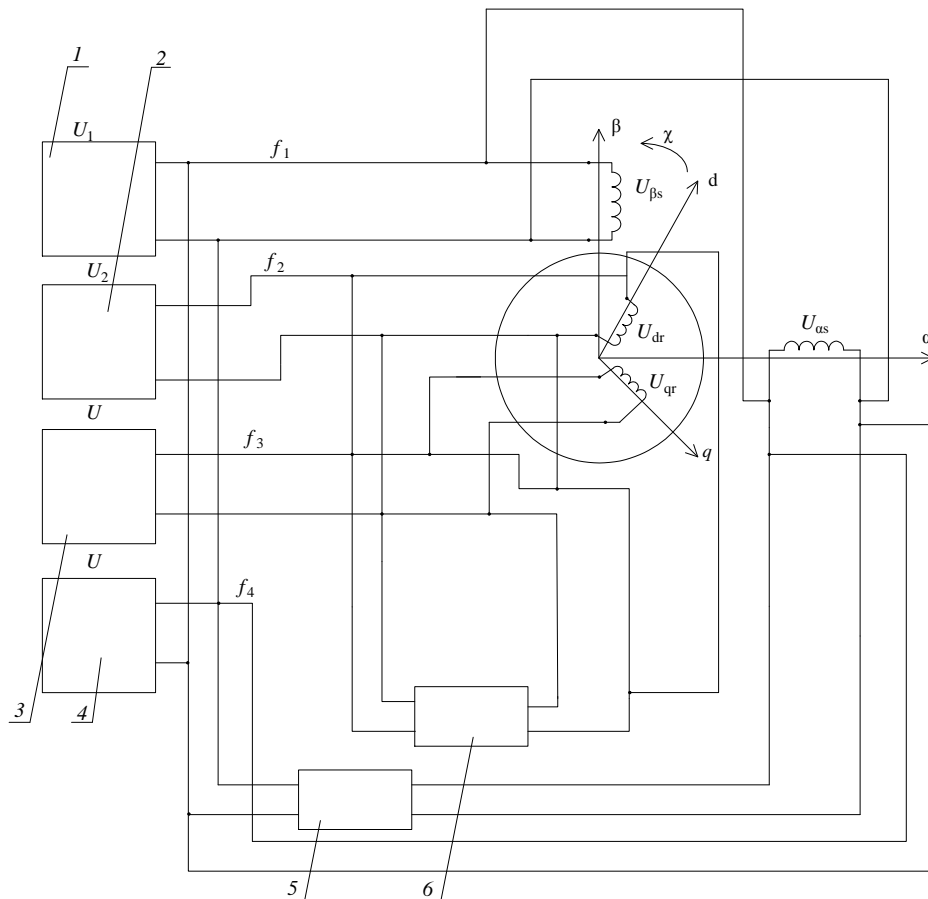


Рис. 1. Схема включения ЭМПЭ при полигармоническом режиме работы: 1...4 – источники питания обмоток статора и ротора; 5, 6 – фазосдвигающие устройства в обмотках статора и ротора

Выражения для функций управления при питании от источника напряжения обмоток статора и ротора машины двойного питания в преобразованных осях  $\alpha$ ,  $\beta$ , 0 имеют следующий вид:

$$U_{\alpha s}(t) = v_1 U_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha');$$

$$U_{\beta s}(t) = v_2 U_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta');$$

$$U_{\alpha r}(t) = v_3 U_{m3} \sin(\omega_3 t + \gamma) \cos(\theta) \pm v_4 U_{m4} \sin(\omega_4 t + \phi) \sin(\theta);$$

$$U_{\beta r}(t) = -v_4 U_{m4} \sin(\omega_3 t + \gamma) \sin(\theta) \pm v_3 U_{m3} \sin(\omega_4 t + \phi) \cos(\theta),$$

(2)

где  $U_{m1}$ ,  $U_{m2}$ ,  $U_{m3}$ ,  $U_{m4}$  – амплитудные значения фазных напряжений обмоток статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\omega_1 \dots \omega_4$  – угловые частоты вращения магнитных полей статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\alpha'$ ,  $\beta'$ ,  $\gamma$ ,  $\phi$  – начальные фазовые сдвиги питающих напряжений обмоток статора и ротора исполнительного двигателя;  $\theta$  – угол пространственного сдвига обмоток.

На примере колебательного режима работы как одного из специальных режимов [14–16] покажем формирование качающегося магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины двойного питания. Качающееся магнитное поле возникает в воздушном зазоре МДП, если хотя бы одно из фазных потокоцеплений представляет собой периодическую временную функцию частоты  $\omega$ , балансно-модулированную периодическим сигналом частоты  $\Omega$  по амплитуде или частоте или модулированную мо-

нотонным сигналом со средней скоростью  $\Omega$   $v$  по фазе [2, 4].

Например, при синусоидальной балансной амплитудной модуляции напряжения (тока) выражения для потокоцеплений обмоток статора по оси  $\beta$  запишем в виде

$$\Psi_{\alpha s}(t) = \Psi_{m1} \cos(\omega t + \beta');$$

$$\Psi_{\beta s}(t) = \Psi_{m2} \sin(\Omega t + \alpha')(\omega t + \beta'),$$

(3)

и тогда перемещение пространственного результирующего вектора потокоцепления (рис. 2, а) в воздушном зазоре можно описать законом:

$$\chi_0 = \arg[\Psi_s] = \arctg \left[ \Psi_{m1}^{-1} \Psi_{m2} \sin(\Omega t + \alpha') \operatorname{tg}(\omega t + \beta') \right],$$

где  $\chi_0$  – обобщенная координата положения вектора  $\Psi_s$ , рад. Для электродвигателей углового колебательного движения  $\chi_0 = \phi_0$ , а для двигателей прямолинейного колебательного движения  $\chi_0 = (\pi \phi_0) / \tau$ , где  $\chi_0$  – линейная координата вектора  $\Psi_s$ ;  $\tau$  – полюсное деление.

В случае балансной косинусоидальной частотной модуляции напряжений (токов) питания выражения для потокоцеплений обмоток статора по осям  $\alpha$  и  $\beta$  запишем в виде

$$\Psi_{\alpha s}(t) = \Psi_{m1} \cos \left( \omega \int \cos(\Omega t + \alpha') dt + \beta' \right);$$

$$\Psi_{\beta s}(t) = \Psi_{m2} \sin \left( \omega \int \cos(\Omega t + \alpha') dt + \beta' \right),$$

(5)

закон движения поля (см. рис. 2, б) имеет вид

$$\chi_0 = \arctg \left[ \psi_{m1}^{-1} \psi_{m2} \operatorname{tg} \left[ \omega \int \cos(\Omega t + \alpha') dt + \beta' \right] \right]. \quad (6)$$

При линейной фазовой модуляции питающего напряжения (тока) выражения для потокосцеплений обмоток статора по оси  $\beta$  запишем в виде

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha s}(t) &= \psi_{m1} \cos(\omega t + \beta'); \\ \psi_{\beta s}(t) &= \psi_{m2} \sin[(\omega t + \beta') + (\Omega t + \alpha')], \end{aligned} \quad (7)$$

закон движения поля (рис. 2, в):

$$\chi_0 = \arctg \left[ \psi_{m1}^{-1} \psi_{m2} \left[ \operatorname{tg}(\omega t + \beta') \cos(\Omega t + \alpha') + \sin(\Omega t + \alpha') \right] \right]. \quad (8)$$

При частотной модуляции закон движения поля близок к синусоидальному. Особенно заметным это становится при отношении  $\psi_{m1}/\psi_{m2} \approx 1$ , поскольку закон движения поля, а следовательно, и подвижной части электродвигателя, практически повторяет закон модуляции. Это означает, что способ частотной модуляции позволяет строить хорошо управляемые вибрационные электроприводы, работающие в специальных режимах работы. Поэтому в дальнейшем

будем использовать амплитудную и косинусоидальную частотную модуляцию при развертке частоты колебаний.

При исследовании электромеханических переходных процессов, протекающих в МДП, работающей в специальных режимах работы, необходимо: задать начальные условия (данные о нагрузке, функциях регулирования), определить базовые величины и рассчитать параметры двигателя в относительных единицах, а также коэффициенты, входящие в математическую модель [1, 17]. Последние приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Параметры исследуемого двигателя										
Энергетические показатели		Механическая характеристика			Параметры схемы замещения					
$\cos(\varphi)$	$p$	$\eta$	$m_m$	$s_{ном}$	$s_{кр}$	$x_\mu$	$R'_1$	$x'_1$	$R'_2$	$x'_2$
о.е.		%	о.е.	%	%	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.	о.е.
0,7	4	80	0,5	6,4	9	1,6	0,06	0,11	0,094	0,175

Таблица 3

Основные базовые величины				Вспомогательные базовые величины						
$U_b$	$I_b$	$P_b$	$\omega_b$	$t_b$	$Z_b$	$L_b$	$M_{мех}$	$L_{мех}$	$R_{мех}$	$C_{мб}$
В	А	Вт	рад/с	с	Ом	Гн	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^3}{\text{рад}^3}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}^2}{\text{рад}^2}$	$\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$
311,127	18,225	8,5	314,159	0,00319	17,071	0,054	108,297	0,00439	1,379	433,187

Алгоритм расчета математической модели МДП при питании от источников токов, реализованный в интегрированной математической среде моделирования, представлен на рис. 3.

Исходными данными для расчета являются параметры двигателя и источника питания, начальные условия координаты и скорости ротора двигателя, интервал изменения времени  $t$ , количество точек для численных расчетов. Они задаются в блоках 2, 3, 4 (см. рис. 3).

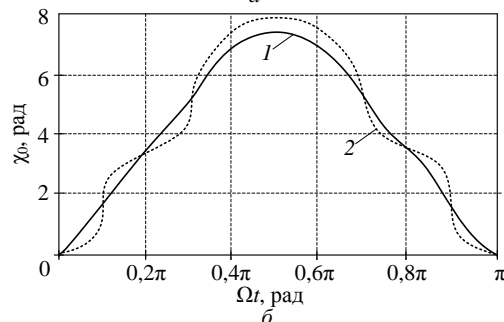
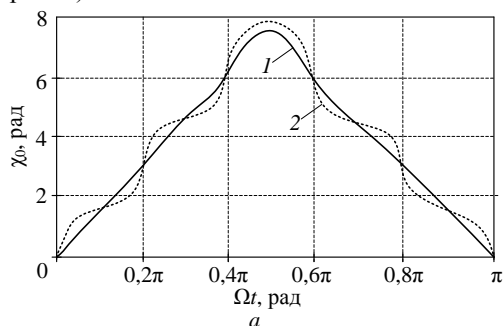


Рис. 2 (начало)

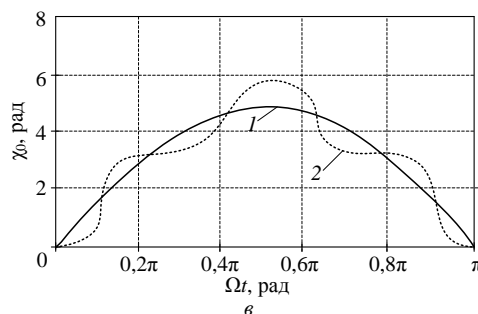


Рис. 2 (окончание). Полу периоды колебаний положения пространственного результирующего вектора потокосцепления при: синусоидальной балансной амплитудной (а);

линейной фазовой (б) и балансной косинусоидальной частотной (в) модуляциях МДС в случае:  $\Omega/\omega = 0,2$ ;  $\alpha = \beta = 0$ ; 1 -  $\psi_{m1} = \psi_{m2}$ ; 2 -  $\psi_{m1} = 5\psi_{m2}$ ; 1 - математическое моделирование; 2 - аналитические выражения

В блоке 5 определяется приращение интервала времени  $\Delta t$ , влияющее на точность вычисления. В блоках 6–8 производится расчёт требуемых величин с дальнейшей проверкой результата (блок 9) и вывода их в виде графика.

Система итерационных уравнений для электромеханического преобразователя, работающего в режиме МДП (в общем случае), при питании его от источника тока соответствует системе (9), где  $t_j$  – время модели;  $\Delta t$  – интервал приращения времени;  $I_1 \dots I_4$  – амплитудные значения относительных токов обмоток статора и ротора;  $\omega'_1 \dots \omega'_4$  – относительные значения угловых скоростей вращения.

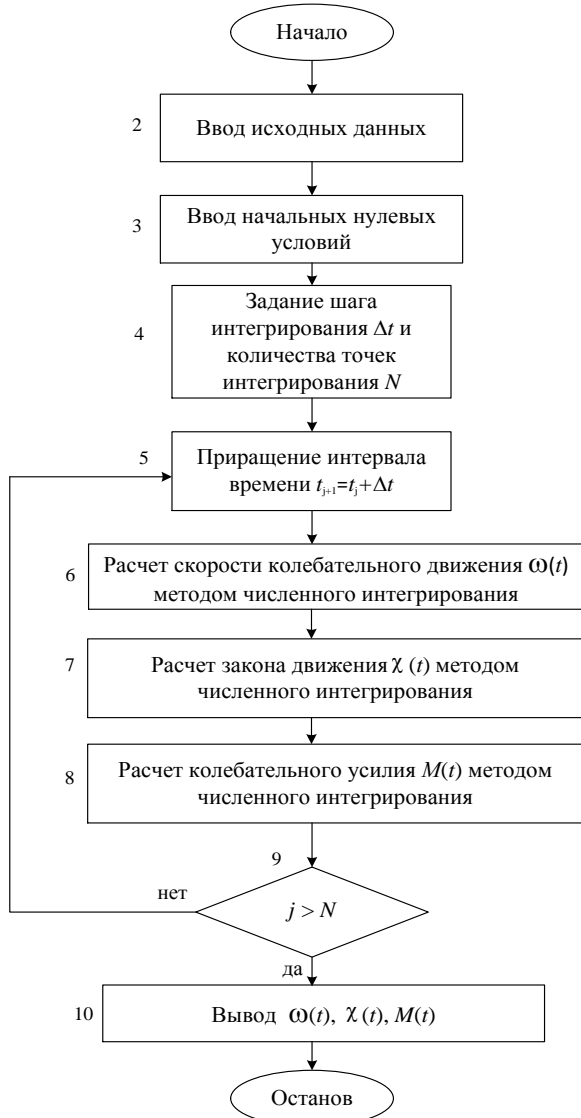


Рис. 3. Алгоритм расчета математической модели

магнитных полей статора и ротора по осям  $\alpha$  и  $\beta$ ;  $\Omega'$  – относительное значение частоты колебаний полей относительно друг друга;  $\chi$  – закон изменения подвижного элемента МДП.

Исследования динамических режимов работы МДП проводились на базе асинхронного кранового двигателя с фазным ротором типа 4АК160S8У3 со степенью защиты IP44 и синхронной частотой вращения, равной  $n_0 = 750$  об/мин, мощностью  $P_2 = 5,5$  кВт [13] с доработками со стороны ротора. Параметры исследуемого двигателя представлены в табл. 2.

Расчетные базовые значения и параметры схемы замещения МДП с учетом влияния частоты колебания  $\Omega'$  на параметры приведены в табл. 3 при угловой частоте колебаний  $\Omega = 6,28$  рад/с.

**Результаты**

В качестве результатов моделирования представим временные зависимости (рис. 4): закона изменения координаты подвижного элемента  $\chi = f(t)$ , угловой скорости  $\omega = f(t)$  и электромагнитного момента МДП  $M_{эм} = f(t)$  при пуске двигателя на частоту  $\Omega' = 0,1$  о.е. при реализации колебательного режима работы.

Кроме того, при реализации колебаний (вне зависимости от режима работы) была применена косинусоидально-частотная токовая модуляция (7), обеспечивающая наиболее плавную развертку частоты [18], поэтому было исследовано влияние амплитуды питающих токов статора по оси  $\alpha$  на динамические показатели вибрационного электропривода (колебательный режим работы), а именно: ударных значений электромагнитного момента и времени переходного процесса (рис. 5).

Следует отметить, что наибольшее влияние изменение относительной амплитуды питающих токов статора  $i_{ас}$  оказывает на время переходного процесса и имеет явно выраженный экспоненциальный характер.

$$\begin{bmatrix} t_{j+1} \\ \omega_{j+1} \\ \chi_{j+1} \\ M_{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_j + \Delta t, \\ \omega_j + \Delta t \frac{p}{J} \left[ I_1 L_m \sin(\omega'_1 t_j + \alpha') (-I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \sin(\theta_j) + I_4 \cos(\omega'_4 t_j + \phi) \sin(\Omega' t_j) \cos(\theta_j)) - \right. \\ \left. - L_m I_2 \cos(\omega'_2 t_j + \beta') \sin(\Omega' t_j) (I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \cos(\omega'_1 t_j) \sin(\Omega' t_j) \sin(\theta_j)) - R_g \omega_j - C_m \chi_j, \right] \\ \chi_j + \Delta t \omega_j, \\ I_1 L_m \sin(\omega'_1 t_j + \alpha') (-I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \sin(\theta_j) + I_4 \cos(\omega'_4 t_j + \phi) \sin(\Omega' t_j) \cos(\theta_j)) - \\ - L_m I_2 \cos(\omega'_2 t_j + \beta') \sin(\Omega' t_j) (I_3 \sin(\omega'_3 t_j + \gamma) \sin(\theta_j) + I_4 \cos(\omega'_4 t_j + \phi) \sin(\Omega' t_j) \cos(\theta_j)), \end{bmatrix}, \quad (9)$$

Таблица 4

**Параметры схемы замещения МДП**

Относительные величины при $\Omega = 0,02$ о.е. или 6,28 рад/с										
$R_{ас}$	$R_{\beta s}$	$R_{ar}$	$R_{\beta r}$	$L_{ас}$	$L_{\beta s}$	$L_{ar}$	$L_{\beta r}$	$L_m$	$J$	
0,065	0,063	0,097	0,096	0,017	0,015	0,027	0,03	0,0559	0,028	

На основе системы (9) был исследован ряд специальных режимов работы вибрационного электропривода (рис. 6, 7), для которого характерны: колеба-

тельный, колебательно-вращательный, а также полигармонический режимы.

На зависимостях (см. рис. 6, 7) приняты следующие обозначения: 1 – колебательный режим работы МДП при согласном включении; 2, 3 – колебательно-вращательный режим работы МДП при создании колебательного поля со стороны статора и ротора соответственно; 4 – полигармонический режим работы МДП с кратной частотой.

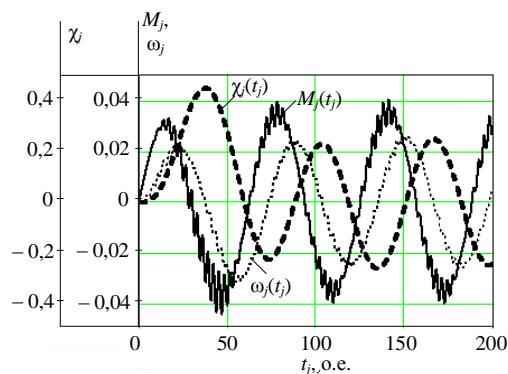


Рис. 4. Закон изменения координаты подвижного элемента, скорости и момента МДП при пуске двигателя на частоту  $\Omega' = 0,1$  о.е. при реализации колебательного режима работы

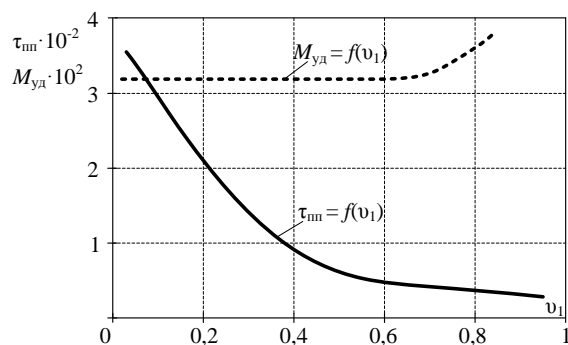


Рис. 5. Зависимости ударного электромагнитного момента МДП и времени переходного процесса от амплитуды тока обмотки статора  $i_{ас}$  при модулирующей частоте  $\Omega = 0,1$  о.е.

В качестве параметров нагрузки выступают: суммарный момент инерции нагрузки  $J_n$ , коэффициент демпфирующего момента нагрузки  $R_g$ , к исследуемым параметрам отнесём такие, как время переходного процесса  $\tau_{пн}$ , ударные значения электромагнитного момента МДП  $M_{уд}$ , установившиеся значения угловой скорости вращения поля двигателя  $\omega_{уст}$  и установившиеся значения амплитуды закона движения вала двигателя  $\chi_m$ . Все вышеобозначенные, параметры приведены в относительных единицах.

Приведем практические рекомендации по реализации специальных режимов работы силового вибрационного электропривода, в состав которого входит МДП (табл. 5).

При увеличении суммарного момента инерции нагрузки  $J_n$  общий характер времени переходного процесса можно охарактеризовать как стабильное увеличение с явно выраженным экспоненциальным характером в случае полигармонического и колебательного режимов работы (рис. 6, а, кривые 1, 4).

Увеличение коэффициента демпфирующего момента нагрузки  $R_g$  в заданных пределах (см. рис. 6, б) приводит к наличию резонансных явлений (см. рис. 6, б, кривые 1–3) для всех режимов работы силового электропривода, кроме полигармонического. Кроме того, следует отметить, что точки резонанса не одинаковы и самое большое значение  $R_g = 4$  коэффициента демпфирующего момента нагрузки имеет место для колебательного режима работы

МДП. Согласно работам [1, 15] наличие резонансных явлений при изменении данного параметра говорит о том, что необходимо более детально рассматривать вопрос динамической устойчивости при резком увеличении инерционных масс, так как происходит смещение динамической нейтральной колебаний.

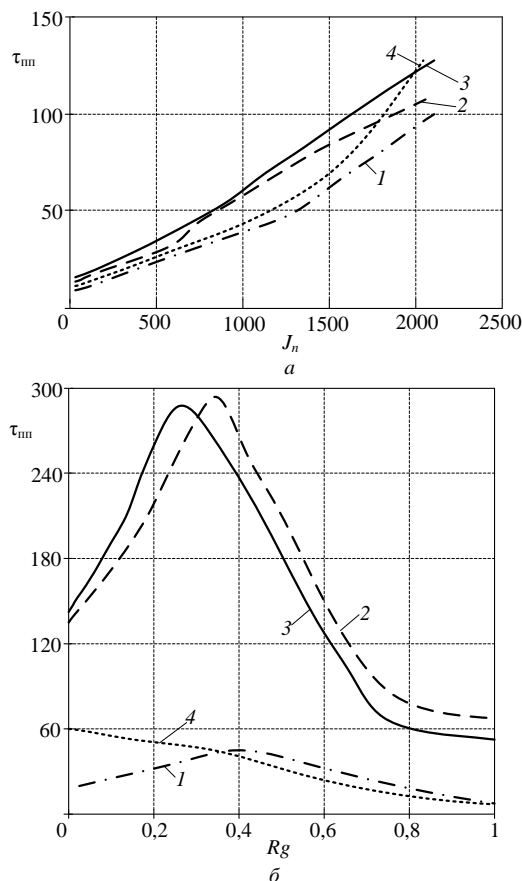


Рис. 6. Зависимость времени переходного процесса  $\tau_{пн}$  от: а – момента инерционной нагрузки  $J_n$ ; б – коэффициента демпфирующего момента нагрузки  $R_g$

Исследования показали, что наибольшее влияние на установившиеся значения амплитуды закона изменения подвижного элемента исполнительного двигателя  $\chi_m$  имеет суммарный момент инерции нагрузки  $J_n$  (рис. 7). Значения  $\chi_m$  уменьшаются с увеличением параметра  $J_n$  по экспоненциальному закону во всех случаях (кривые 2–4), кроме колебательного. Следует отметить, что при формировании колебательного поля со стороны ротора при реализации колебательно-вращательного режима работы изменение исследуемого параметра происходит в отрицательной области.

Также следует отметить, что немаловажным параметром нагрузки является коэффициент позиционной нагрузки  $C_m$ , но исследования показали, что только в колебательном режиме работы электропривода вибростола необходимо учитывать точки резонансных явлений, которые отвечают за устойчивость работы привода. Во всех остальных рассмотренных случаях специальных режимов работы МДП данный параметр не влияет на динамические показатели

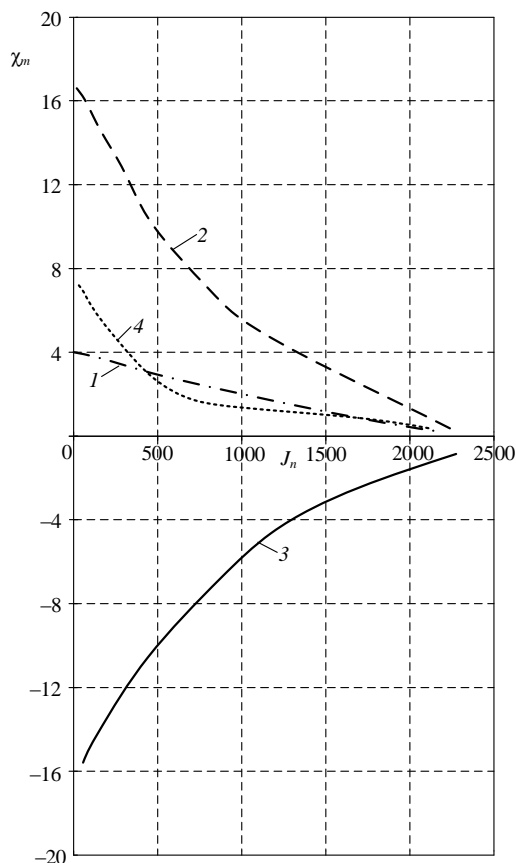


Рис. 7. Зависимость установившегося значения амплитуды закона изменения подвижного элемента двигателя  $\chi_m$  от момента инерции нагрузки  $J_n$

вибропривода. Поэтому данные кривые здесь не приводим.

### Выводы

1. Наиболее востребованным способом формирования заданных колебаний в электроприводе вибросистем является косинусоидально-частотный, так как при частотной модуляции закон движения поля близок к синусоидальному.

2. Анализ влияния параметров нагрузки на динамические показатели электропривода вибростола показал, что необходимо комплексно воздействовать на них, так как одностороннее воздействие ведет либо к увеличению времени переходного процесса  $\tau_{\text{пн}}$  (при увеличении суммарного момента инерции нагрузки  $J_n$ ) и уменьшению установившихся значений амплитуды закона изменения подвижного элемента двигателя  $\chi_m$  – в 12 раз по сравнению с номинальными значениями, либо, напротив, к уменьшению первого ( $\tau_{\text{пн}}$ ) и возникновению резонансного пика во всех рассмотренных режимах работы электропривода вибростола, кроме полигармонического.

3. Практическое применение специальных режимов работы для вибрационных силовых электроприводов с МДП возможно при условии, что частота колебаний будет кратна 5 Гц, так как кратность частот основной  $\omega$  и модулированной  $\Omega$  должна иметь в результате рациональное число, потому что от этого зависит устойчивость системы, а амплитуды питающих токов не должны отличаться более чем на 25% от номинального значения в обе стороны.

Таблица 5

### Алгоритм формирования специальных режимов работы для силового вибрационного электропривода

Режим работы исполнительного двигателя (МДП)	Коэффициенты сигнала, $v_i$ , о.е.	Угловая частота вращения магнитных полей обмоток, $\omega_i$	Фазовый сдвиг, рад	Развертка частоты	Технологический процесс
Колебательный	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 = \omega_2 = \omega,$ $\omega_3 = \omega_4 = \omega'$	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= \varphi = 0$	Синусоидальная балансная амплитудная, косинусоидальная частотная	Виброуплотнение грунтов, вибролитьё
Колебательно-вращательный	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega,$ $\omega_4 = \omega'$	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= 0,$ $\varphi = \pi/2$	Линейная фазовая	Вибрационная транспортировка руды
Полигармонический	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 = \omega_3 = \omega,$ $\omega_2 = \omega', \omega_4 = \omega''$	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $\varphi = 0$	Синусоидальная балансная амплитудная	Вибрационная сортировка угля, первичное дробление угля, виброкалибровка оборудования
	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_1 - \omega_2 = \omega_3 - \omega_4$ частота не кратна 5 Гц	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= \varphi = 0$	Косинусоидальная частотная	
	$v_1 = v_2 = 1,$ $v_3 = v_4 = 1,225$	$\omega_2 - \omega_1 = \omega_4 - \omega_3$ частота кратна 5 Гц	$\alpha' = \beta' = \gamma =$ $= \varphi = 0$	Косинусоидальная частотная	

### Литература

1. Aristov A.V. Voltage Converter with the Controlled Energy Balance For the Electric Drive with the Pulsation Motion Mode / A.V. Aristov, V.O. Nagorniy, A.M. Gavrilov // Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON. – 2015. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7146983> (дата обращения: 29.01.2020).

2. Пат. 2 592 080 РФ, МПК Н 02 Р 25/02. Электропривод колебательно-вращательного движения / А.В. Аристов (РФ), И.А. Эккерт (РФ). – № 2 015 109 442 / 07, заявл. 17.03.15; опубл. 20.07.16, Бюл. № 20. – 5 с.

3. Use of Creeping Speed Mode in Discrete Control and Measuring Equipment with Digital-program Control / L. Payuk, N. Voronina, S. Korepanov, O. Galtseva, N. Natalinova // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901060> (дата обращения: 25.02.2019).

4. Пат. на полезную модель 88 874 РФ, МПК Н 02 Р 7/00. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения / А.В. Аристов (РФ), Н.А. Воронина (РФ). – № 2 009 125 766 / 22; заявл. 06.07.09; опубл. 20.11.09, Бюл. № 32. – 8 с.

5. Пат. 90 277 РФ, МПК Н 02 Р 7/00. Электропривод колебательного движения / А.В. Аристов (РФ), Л.А. Паюк (РФ). – № 2 009 125 765 / 22; заявл. 06.07.09; опубл. 27.12.09, Бюл. № 36. – 7 с.

6. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения / В.И. Луковников. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

7. Луковников В.И. Энергетические показатели асинхронных короткозамкнутых электродвигателей колебательного режима работы и пути их повышения / В.И. Луковников, В.В. Тодарев, Л.В. Веппер // Вестник Гомельского гос. техн. ун-та им. П.О. Сухого. – 2000. – № 1. – С. 33–37.

8. Пат. на полезную модель 95 323 РФ, МПК В 81 В 3/00. Электромеханизм / Д.Ю. Ляпунов (РФ). – № 2 010 108 272 / 22; заявл. 05.03.10; опубл. 27.06.10, Бюл. № 18. – 7 с.

9. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables / A.V. Glazachev, Y.N. Dementiev, I.V. Rakov, A.D. Umurzakova // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 91. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179101039> (дата обращения: 13.05.2019).

10. Литвин В. Колебательный режим линейного асинхронного двигателя в приводе зерноочистительной машины / В. Литвин, Ф. Мамедов, А. Сафонов // Научные труды Русунского ун-та (Русе, Болгария). – 2009. – Т. 48, сер. 3.1. – С. 31–34.

11. Смирнов А.О. Обеспечение устойчивой работы частотно-управляемого асинхронного электропривода при низких температурах окружающей среды / А.О. Смирнов, В.Г. Букреев, А.Э. Зубреков // Изв. высш. учеб. завед. Электромеханика (Новочеркасск, Ростовская обл.). – 2016. – № 4. – С. 41–48.

12. Payuk L.A. Energy Characteristics of Electric Drive of Oscillatory Motion at the Shock-Free Start / L.A. Payuk, N.A. Voronina, O.V. Galtseva // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 671/ – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012044> (дата обращения: 05.05.2019).

13. Special Modes of AC Drives Operation in the Mining Industry / L. Payuk, N. Voronina, O. Galtseva, D. Zhang, A. Rogachev // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 15. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171503014> (дата обращения: 08.05.2019).

14. Петров И.И. Специальные режимы работы асинхронного электропривода / И.И. Петров, А.М. Мейстель. – М.: Энергия, 1968. – 264 с.

15. Грачев С.А. Безредукторный электропривод периодического движения / С.А. Грачев, В.И. Луковников. – Минск: Высшая школа, 1991. – 160 с.

16. Рудченко Ю.А. Проблемы теории и практики безредукторных электроприводов периодического движения / Ю.А. Рудченко, А.В. Козлов, А.А. Толстенков // Вестник Белорусско-Российского ун-та (Могилёв, Беларусь). – 2011. – № 4 (33). – С. 129–137.

17. Yudinsev A. Mathematical simulation of oscillating electric drives in current-frequency modulation / A. Yudinsev, A. Aristov // Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Technique and Technologies. – 2002. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1213746> (дата обращения: 27.03.2020).

18. Аристов А.В. Формирование шагового режима работы асинхронного двигателя при потенциальной амплитудно-балансной модуляции / А.В. Аристов, И.А. Эк-керт // Доклады ТУСУР. – 2014. – № 1(31). – С. 217–221.

#### Паюк Любовь Анатольевна

Канд. техн. наук, ст. преп. отделения электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) Инженерной школы энергетики (ИШЭ) Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ) Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7-903-955-83-34  
Эл. почта: lubara81@mail.ru

#### Воронина Наталья Алексеевна

Канд. техн. наук, доцент ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0001-9327-6441  
Тел.: +7-913-850-16-60  
Эл. почта: voronina@tpu.ru

#### Ляпунов Данил Юрьевич

Канд. техн. наук, доцент ОЭЭ ИШЭ НИ ТПУ Ленина пр-т, д. 30, г. Томск, Россия, 634050  
ORCID 0000-0001-9326-3595  
Тел.: +7-903-913-61-37  
Эл. почта: lyapunov@tpu.ru

Payuk L.A., Voronina N.A., Lyapunov D.Yu.

#### Special Modes of Vibratory Electric Drive

The paper deals with the algorithm of the supply voltages and currents for special modes of operation of vibrating actuators being the most common type of vibratory electric drive. A special feature of the electric drive under consideration is the double-fed electric machine (DFEM) being a drive motor for the vibrating system. It is demonstrated, that for DFEM operating in the oscillatory, vibrational-rotational and polyharmonic modes, the best performance shows an electric drive with cosine frequency modulated control signal. A mathematical model of the DFEM has been developed, that allows investigating various operating modes of vibration equipment. The evidences for practical relevance for the vibration drives for various applications are provided. The methods to estimate the way the load parameters affect the dynamic performance of the motor drive are used. The effect of power supply and load parameters on the dynamic performance of the DFEM and some practical recommendations are outlined.

**Keywords:** template, component, formatting, style, correct way to use the styles.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-122-130

#### References

1. Aristov A.V. Voltage Converter with the Controlled Energy Balance For the Electric Drive with the Pulsation Motion Mode / A.V. Aristov, V.O. Nagorniy, A.M. Gavrilov // *Proceedings of International Siberian Conference on Control and Communications SIBCON*, 2015. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7146983> (Accessed: January 29, 2020).

2. Aristov A.V., Ekkert I.A. Elektroprivod kolebatel'no-vraschatel'nogo dvizheniya [Electric drive of oscillatory and rotary motion]. Patent RF, no. 2592080, 2016.

3. Use of Creeping Speed Mode in Discrete Control and Measuring Equipment with Digital-program Control / L. Payuk, N. Voronina, S. Korepanov, O. Galtseva, N. Natalinova // *MATEC Web of Conferences*, 2016, vol. 79. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167901060> (Accessed: February 25, 25.02.2019).



4. Aristov A.V., Voronina N.A. Ustroystvo dlya upravleniya dvuhfaznym asinhronnym dvigatelem v rezhime previstogo dvizheniya [A device for control of two-phase asynchronous motor in the mode of interruptive moving]. Patent RF, no. 88874, 2009.
5. Aristov A.V., Payuk L.A. Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya [Oscillatory Electric Drive]. Patent RF, no. 90277, 2009.
6. Lukovnikov V.I. *Elektroprivod kolebatel'nogo dvizheniya* [Oscillatory Electric Drive]. Moscow, Energoatomizdat, 1984. 152 p. (in Russ.).
7. Lukovnikov V.I., Todarev V.V., Vepper L.V. [Energy indicators of the squirrel cage asynchronous motors of oscillatory operating mode and methods of their improvement]. *Bulletin of Gomel State Technical University named after P.O. Suhoy*, 2000. no. 1, pp. 33–37 (in Russ.).
8. Lyapunov D.Y. Electromehanizm [Electromechanism]. Patent RF, no. 95323, 2010.
9. Glazachev A.V., Dementiev Y.N., Rakov I.V., Umurzakova A.D. An Asynchronous Electric Drive with the Indirect Control of the Output Variables // *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 91. URL: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20179101039> (Accessed: May 13, 2019).
10. Litvin V., Mamedov F., Safonov A. [Oscillatory mode of the linear asynchronous motor for the grain-cleaning machine]. *Proceedings of University of Ruse*, 2009, vol. 48, part 3.1, pp. 31–34 (in Russ.).
11. Smirnov A.O., Bukreev V.G., Zubrekov A.E. [Providing stable operation of variable frequency electric drive at low ambient temperatures]. *Bulletin of Higher Education Institutions: Electromechanics*, 2016, no. 4, pp. 41–48 (in Russ.).
12. Payuk L.A., Voronina N.A., Galtseva O.V. Energy Characteristics of Electric Drive of Oscillatory Motion at the Shock-Free Start // *Journal of Physics*, 2016, vol. 671, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/671/1/012044> (Accessed: May 05, 05.05.2019).
13. Payuk L., Voronina N., Galtseva O., Zhang D., Rogachev A. Special Modes of AC Drives Operation in the Mining Industry // *E3S Web of Conferences*, 2017, vol. 15. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171503014> (Accessed: May 08, 2019).
14. Petrov I.I., Meystel' A.M. *Spetsial'nye rezhimy raboty asinhronnogo elektroprivoda* [Special operating modes of the asynchronous electric drive]. Moscow, Energiya, 1968. 264 p. (in Russ.).
15. Grachev S.A., Lukovnikov V.I. *Bezreduktorniy elektroprivod periodicheskogo dvizheniya* [Gearless electric drive of periodical motion]. Minsk, Vysshaya shkola, 1991. 160 p. (in Russ.).
16. Rudchenko Y.A., Kozlov A.V., Tolstenkov A.A. [Problems of theory and implementation of the gearless electric drives of oscillatory motion]. *Bulletin of Belorussian and Russian University*, 2011, no. 4 (33), pp. 129–137 (in Russ.).
17. Yudintsev A., Aristov A. Mathematical simulation of oscillating electric drives in current-frequency modulation // *Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-Graduates and Young Scientists: Modern Technique and Technologies*, 2002. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1213746> (Accessed: March 27, 2020).
18. Aristov A.V. [Step operating mode formation of the asynchronous motor with the potential amplitude modulation]. *Proceedings of TUSUR University*, 2014, no. 1 (31), pp. 217–221 (in Russ.).

---

#### Lubov A. Payuk

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,  
School of Energy & Power Engineering,  
Division for Power and Electrical Engineering  
National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7-903-955-83-34  
Email: lubapa81@mail.ru

#### Natalya A. Voronina

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,  
School of Energy & Power Engineering,  
Division for Power and Electrical Engineering, TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0001-9327-6441  
Phone: +7-913-850-16-60  
Email: voronina@tpu.ru

#### Danil Yu. Lyapunov

Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer,  
School of Energy & Power Engineering,  
Division for Power and Electrical Engineering, TPU  
30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050  
ORCID 0000-0001-9326-3595  
Phone: +7-903-913-61-37  
Email: lyapunov@tpu.ru