

## Динамический анализ и синтез механизмов с учетом механической характеристики асинхронного электродвигателя

© Г.А. Тимофеев, И.Е. Люминарский, Е.С. Люминарская

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Правильный выбор параметров электропривода — необходимое условие высокопроизводительной и экономичной работы машинного агрегата. При динамическом синтезе машин с электродвигателями обычно определяют только массу и размеры маховика, обеспечивающего заданную неравномерность движения, и не рассматривают параметры, характеризующие работу электродвигателя. Такой подход не обеспечивает эффективного использования электрической энергии. Представлена методика динамического анализа и синтеза машинного агрегата с асинхронным электродвигателем, которая позволяет исследовать не только неравномерность движения, но и параметры, характеризующие работу электродвигателя: КПД и коэффициент мощности. Эта методика основана на использовании Г-образной схемы замещения электродвигателя. При динамическом синтезе электропривода предложено определять не только момент инерции маховой массы, но и передаточное отношение передаточного механизма из условия обеспечения максимального КПД двигателя и возможности запуска привода. В соответствии с предложенной методикой рассмотрен динамический анализ и синтез плунжерного насоса.*

**Ключевые слова:** электропривод, схема замещения, динамический анализ, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности

**Введение.** В электроприводах потребляется приблизительно 2/3 всей вырабатываемой электроэнергии. Эффективное использование электроэнергии в приводах различных машин имеет огромное техническое и экономическое значение. При динамическом анализе механизмов в установившемся режиме работы ограничиваются вычислением коэффициента неравномерности движения и сравнением его с допустимым значением [1, 2]. При динамическом синтезе определяют момент инерции дополнительной маховой массы, обеспечивающий необходимую неравномерность движения. Расчеты обычно выполняют при постоянном движущем моменте, который определяют из условия равенства нулю суммарной работы. Для уточнения расчетов используют линеаризованную характеристику электродвигателя. Такой подход дает приемлемую точность расчета. Однако для определения характеристик электродвигателя необходимо записывать все уравнения, описывающие работу механической и электрической частей привода, и решать их численными методами с использованием различных программных средств (например, MathCAD).

При изменении передаточного отношения  $U$  передаточного механизма привода изменяются производительность машинного агрегата и полезная мощность двигателя, которая определяет эффективность его работы. Поэтому при динамическом анализе механизмов с электрическим приводом предлагается вычислять характеристики, определяющие экономичность работы электродвигателя, а при динамическом синтезе — выбирать параметры привода с учетом эффективности его работы.

В машинах малой и средней мощности широкое распространение получили экономичные и надежные в эксплуатации асинхронные электродвигатели.

В данной работе рассмотрены динамический анализ и синтез машинного агрегата плунжерного насоса с асинхронным двигателем, выполненным с короткозамкнутым ротором. В предлагаемой динамической модели применяется статическая характеристика двигателя. Для анализа работы привода используют коэффициент неравномерности  $\delta$  и характеристики, определяющие эффективность работы асинхронного двигателя: КПД  $\eta_{дв}$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$ . В сети переменного тока циркулирует реактивная мощность, которая загружает сеть током, не совершающим работу. Значение реактивной мощности оценивается коэффициентом мощности.

**Постановка задачи.** Функциональная схема машинного агрегата плунжерного насоса приведена на рис. 1, кинематическая схема исполнительного механизма — на рис. 2. Рабочий процесс насоса состоит из всасывания (движение плунжера 5 вправо) и нагнетания жидкости (движение влево). При нагнетании давление в цилиндре  $p = 2,75$  МПа, при всасывании —  $p = 0$ .

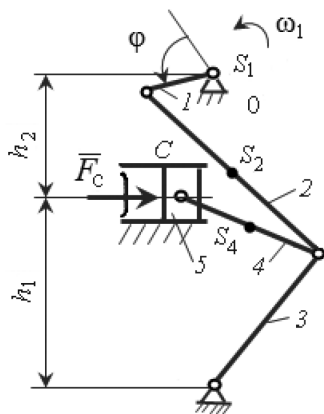
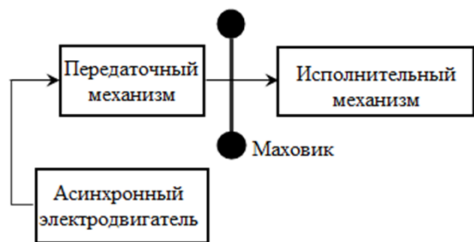


Рис. 1. Функциональная схема машинного агрегата

Рис. 2. Кинематическая схема исполнительного механизма

В рассматриваемом приводе используется асинхронный двигатель 4А80В4У3. Основные размеры исполнительного механизма: длина соответствующих звеньев  $l_1 = 0,054$  м,  $l_2 = 0,268$  м,  $l_3 = l_4 = 0,17$  м,  $h_1 = 0,13$  м,  $h_2 = 0,225$  м, диаметр поршня  $d = 0,05$  м. Массы звеньев 2, 4, 5 и моменты инерции звеньев 2 и 4:  $m_2 = 21$  кг,  $m_4 = 17$  кг,  $m_5 = 55$  кг,  $J_{S_2} = 0,638$  кг·м<sup>2</sup>,  $J_{S_4} = 0,44$  кг·м<sup>2</sup>. Момент инерции ко-ромысла 3 не учитывается. Приведенный момент инерции первой группы звеньев, учитывающий моменты инерции кривошипа 1, передаточного механизма, ротора электродвигателя и маховика,  $J_1^{пр} = 12,7$  кг·м<sup>2</sup>. Передаточное отношение передаточного механизма  $U = 8$ . Допустимое значение коэффициента неравномерности  $[\delta] = 1/14$ .

В данной работе предлагается новая формулировка задач динамического анализа и синтеза машинного агрегата с асинхронным электродвигателем.

*Задача динамического анализа:* для заданных значений исходных параметров определить среднюю угловую скорость кривошипа, коэффициент неравномерности движения, КПД двигателя и коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  двигателя.

*Задача динамического синтеза:* определить приведенный момент инерции дополнительной маховой массы и передаточное отношение передаточного механизма, обеспечивающие заданную неравномерность движения, наибольшее значение КПД двигателя, высокие значения коэффициента мощности и возможность запуска привода из любого начального положения. Для увеличения производительности машинного агрегата необходимо увеличивать синхронную частоту вращения ротора.

**Математическая модель.** Используемый асинхронный двигатель 4А80В4У3 имеет следующие характеристики: фазное напряжение обмотки статора  $U_{1ф} = 220$  В; номинальная мощность  $P_{2н} = 1,5$  кВт; синхронная частота вращения ротора  $n_c = 1500$  мин<sup>-1</sup>; отношение пускового момента к номинальному  $\lambda_{п} = M_{п} / M_{н} = 2,0$ ; отношение минимального момента к номинальному  $M_{\min} / M_{н} = 1,6$ ; отношение максимального момента к номинальному  $\lambda_{\max} = M_{\max} / M_{н} = 2,2$ ; критическое скольжение  $s_{кр} = 0,345$ ; КПД и коэффициент мощности при номинальном режиме работы  $\eta_{н} = 0,77$ ,  $\cos \varphi_{1н} = 0,83$ .

Математическую модель асинхронного двигателя в установившемся режиме работы обычно представляют Г-образной схемой замещения (рис. 3) [3–9]. Используя эту схему замещения, получают статическую характеристику асинхронного двигателя

$$M(s) = \frac{3U_{1\phi}^2 r_2'}{2\omega_c s \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + x_{\kappa}^2 \right]} - M_0, \quad (1)$$

где  $s = \frac{n_c - n}{n_c}$  — коэффициент скольжения;  $\omega_c = \pi n_c / 30$  — синхронная угловая скорость (угловая скорость вращения магнитного поля статора);  $M_0$  — механический момент холостого хода.

Первое слагаемое представляет собой электромагнитный момент, второе слагаемое ( $-M_0$ ) учитывает механические потери электродвигателя. Момент  $M_0$  вычисляется через номинальный момент  $M_n$  [7]:

$$M_0 = M_n (\xi - 1),$$

где  $\xi = 1,02 \dots 1,10$ .

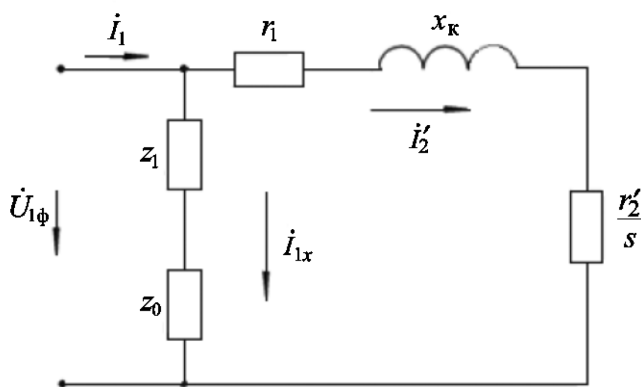


Рис. 3. Г-образная схема замещения одной фазы асинхронного двигателя

При использовании Г-образной схемы замещения затраченную мощность  $P_1$ , электромагнитную мощность  $P_{эм}$ , КПД  $\eta_{дв}$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  электродвигателя вычисляли по следующим зависимостям [7]:

$$P_1 = 3U_{1\phi} I_1 \cos \varphi_1; \quad P_{эм} = 3I_2'^2 r_2' / s; \quad (2)$$

$$\eta_{дв} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(P_{эм} - M_0 \omega_c)(1-s)}{P_1}; \quad \cos \varphi_1 = \cos(\varphi_{U_{1\phi}} - \varphi_{I_1}),$$

где  $P_2, P_1$  — полезная и затраченная мощности электродвигателя.

Действующие значения и начальные фазы токов в ветвях схемы замещения рассчитывали по законам Кирхгофа для электрических цепей [7].

Для определения параметров схемы замещения были использованы следующие условия:

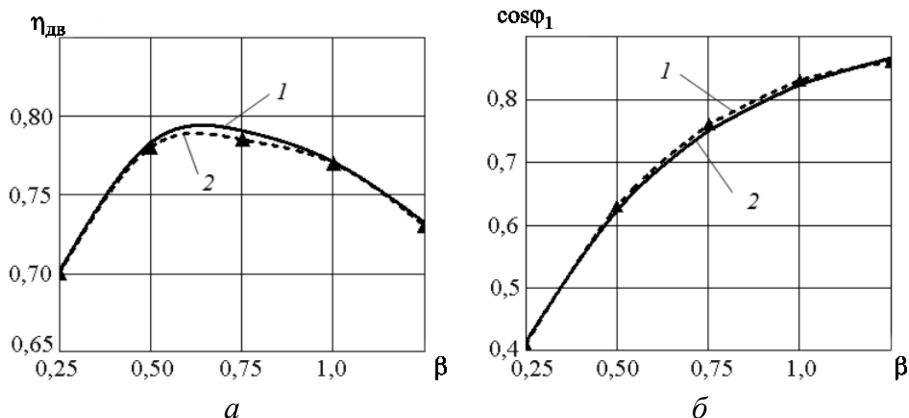
- 1)  $M(s_H) = M_H$ ;
- 2)  $M(s_{кр}) = \lambda_{\max} M_H$ ;
- 3)  $\left. \frac{dM}{ds} \right|_{s=s_{кр}} = 0$ ;
- 4)  $\eta(s_H) = \eta_H$ ;
- 5)  $\cos \varphi_1(s_H) = \cos \varphi_{1H}$ .

Левые части приведенных уравнений находили по схеме замещения, правые части принимали по данным каталога [10]. Первые три условия использовали для определения  $r_1$ ,  $r_2'$ ,  $x_k$ , последние два условия — для вычисления активного  $r_0$  и индуктивного  $x_0$  сопротивления контура намагничивания. Значение индуктивного сопротивления  $x_1$  принимали по данным [9].

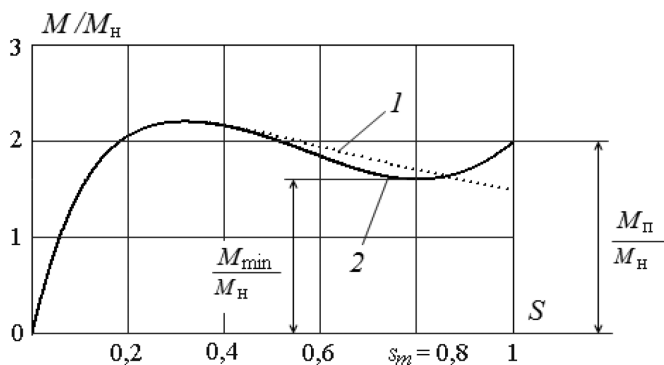
Проведенные в MathCAD расчеты для двигателя 4A80B4Y3 позволили получить следующие значения сопротивлений схемы замещения: комплексное сопротивление обмотки статора  $\underline{z}_1 = r_1 + jx_1 = 8,87 + 4,64j$  Ом; комплексное сопротивление контура намагничивания  $\underline{z}_0 = r_0 + jx_0 = 2,0 + 122j$  Ом; индуктивное сопротивление обмоток для режима короткого замыкания (при неподвижном роторе)  $x_k = 7,43$  Ом; активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора,  $r_2' = 4,17$  Ом.

Для проверки полученных параметров были проведены вычисления КПД  $\eta_{дв}$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  двигателя при различном коэффициенте загрузки  $\beta = P_2/P_{2H}$ . Здесь  $P_2$ ,  $P_{2H}$  — полезная мощность двигателя при заданном и номинальном режимах работы. Выполненные исследования показали удовлетворительное совпадение расчетных зависимостей с данными, приведенными в [9] (рис. 4).

Для улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором алюминиевые стержни обмотки ротора заливают в глубокие пазы. Неравномерное распределение тока по высоте стержней при пуске приводит к увеличению сопротивления обмотки ротора. Механическая характеристика таких двигателей имеет провал при коэффициенте скольжения  $s = s_m = 0,75 \dots 0,85$  (рис. 5). Вращающий момент в точке провала является минимальным моментом  $M_{\min}$ .



**Рис. 4.** Зависимость КПД (а) и коэффициента мощности (б) от коэффициента загрузки двигателя:  
 1 — расчетная; 2 — полученная по данным [9]



**Рис. 5.** Механическая характеристика асинхронного двигателя 4А80В4У3:  
 1 — полученная по формуле (1); 2 — уточненная, полученная по формулам (3), (4)

Для учета указанного провала в механической характеристике вращающий момент  $M$  умножили на дополнительную функцию, которая изменяет механическую характеристику при пуске (или торможении) и не изменяет в установившемся режиме работы,

$$\xi(s) = e^{m(1-1/s)}(a + bs + cs^2). \quad (3)$$

Уточненную механическую характеристику двигателя с короткозамкнутым ротором представили следующей зависимостью:

$$M^*(s) = M(s)\xi(s). \quad (4)$$

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  определили из следующих условий:

- 1)  $M^*(1) = M_{\text{п}}$ ;
- 2)  $M^*(s_m) = M_{\text{мин}}$ ;
- 3)  $\frac{d}{ds}M^*(s_m) = 0$ .

Для используемого асинхронного двигателя 4А80В4У3 получили следующие значения коэффициентов:  $a = -3,07$ ;  $b = 4,6$ ;  $c = -1,2$ . На рис. 5 приведены механическая характеристика двигателя, полученная по формуле (1), и уточненная характеристика, полученная по формулам (3), (4) при  $m = 4$ .

Уточненную характеристику можно использовать для исследования пусковых и тормозных свойств электропривода.

При решении задачи динамики плунжерного насоса в качестве обобщенной координаты принимали угол  $\varphi$  поворота кривошипа  $I$  (см. рис. 2), который отсчитывается от «мертвого» положения начала холостого хода. Суммарный приведенный момент инерции, имеющий постоянную  $J_I^{\text{пп}}$  и переменную  $J_{II}^{\text{пп}}(\varphi)$  составляющие, вычисляли по формулам

$$J_{\Sigma}^{\text{пп}}(\varphi) = J_I^{\text{пп}} + J_{II}^{\text{пп}}(\varphi);$$

$$J_{II}^{\text{пп}}(\varphi) = m_2 V_{qS_2}^2 + J_{2S} \omega_{q2}^2 + m_4 V_{qS_4}^2 + J_{4S} \omega_{q4}^2 + m_5 V_{qC}^2,$$

где  $V_{qS_2}$ ,  $V_{qS_4}$ ,  $V_{qC}$  — передаточные функции скоростей точек  $S_2$ ,  $S_4$  и  $C$ ;  $\omega_{q2}$ ,  $\omega_{q4}$  — передаточные функции угловых скоростей звеньев 2 и 4 (см. рис. 2).

Приведенный момент от сил сопротивления, учитывающий силы тяжести  $G_i$  звеньев и силу сопротивления  $F_C$ , определяли из соотношения

$$M_c^{\text{пп}}(\varphi) = -m_2 g V_{qS_{2y}} - m_4 g V_{qS_{4y}} + F_C V_{qC_x},$$

$$F_C = \begin{cases} 0, & \text{если } V_{qC_x} > 0, \\ p\pi d^2 / 4, & \text{если } V_{qC_x} \leq 0. \end{cases}$$

Формулы для расчета кинематических передаточных функций  $V_{qS_j}$ ,  $\omega_{qj}$ ,  $V_{qC}$  в статье не приводятся. Методы их определения рассматриваются в дисциплине «Теория механизмов и машин» [1, 2].

Приведенный момент инерции второй группы звеньев  $J_{II}^{np}(\varphi)$ , его производная  $\frac{dJ_{II}^{np}}{d\varphi}$ , приведенный момент сил сопротивления  $M_c^{np}(\varphi)$  зависят только от обобщенной координаты и являются периодическими функциями с периодом  $2\pi$ . Эти зависимости необходимо получать до решения дифференциального уравнения движения. В среде MathCAD желательнее выполнить интерполяцию указанных зависимостей на интервале  $(0, 2\pi)$  и затем получить периодические интерполированные функции. На рис. 6 показана интерполяция рассматриваемых функций в MathCAD.

```

N := 100   i := 0..N           dJ_pr(φ) := d/dφ J_prII(φ)
vφ_i := i * 2π / N   vJ_i := J_prII(vφ_i)   vdJ_i := dJ_pr(vφ_i)   vM_i := M_prC(vφ_i)
Js := lspline(vφ, vJ)   J(φ) := interp(Js, vφ, vJ, φ)   J_npII(φ) := J(φ - 2π * trunc(φ / 2π))
dJs := lspline(vφ, vdJ)   dJ(φ) := interp(dJs, vφ, vdJ, φ)   dJ_npII(φ) := dJ(φ - 2π * trunc(φ / 2π))
Ms := lspline(vφ, vM)   M(φ) := interp(Ms, vφ, vM, φ)   M_npC(φ) := M(φ - 2π * trunc(φ / 2π))
    
```

Рис. 6. Интерполяция функций  $J_{II}^{np}(\varphi)$ ,  $\frac{dJ_{II}^{np}}{d\varphi}$ ,  $M_c^{np}(\varphi)$  в среде MathCAD

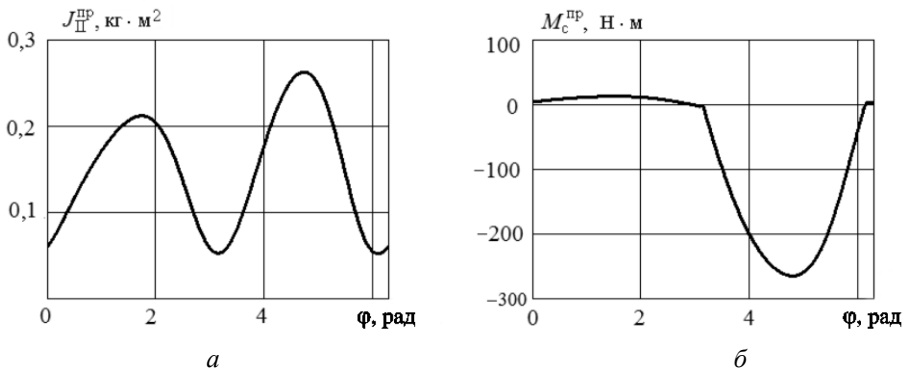
Графики зависимостей приведенного момента инерции  $J_{II}^{np}(\varphi)$  и приведенного момента сил сопротивления  $M_c^{np}(\varphi)$  от обобщенной координаты для исследуемого плунжерного насоса представлены на рис. 7.

Уравнение движения машинного агрегата в дифференциальной форме имеет вид [1]

$$\frac{d}{d\varphi} \left( \frac{J_{\Sigma}^{np} \omega_1^2}{2} \right) = M_{дв}^{np}(\omega_1) + M_c^{np}(\varphi), \quad (5)$$

где  $\omega_1 = \frac{d\varphi}{dt}$  — угловая скорость кривошипа  $l$  (см. рис. 2).





**Рис. 7.** Зависимость приведенного момента инерции  $J_{II}^{np}$  (а) и приведенного момента сил сопротивления  $M_c^{np}$  (б) плунжерного насоса от обобщенной координаты  $\varphi$

Приведенный движущий момент определяли по статической характеристике двигателя:

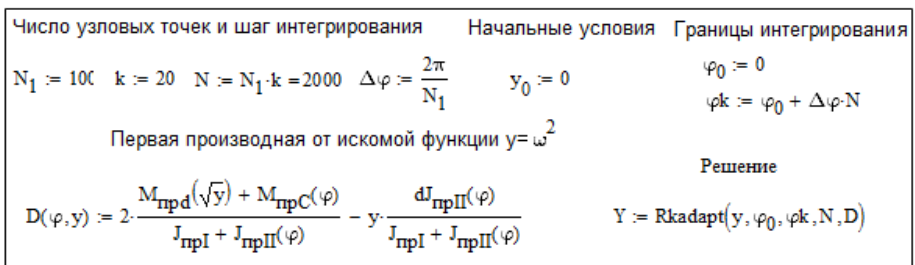
$$M_{дв}^{np}(\omega_1) = M^*(s(\omega_1))U\eta_{общ},$$

где  $s(\omega_1) = \frac{\omega_c - \omega_1 U}{\omega_c}$  — коэффициент скольжения асинхронного двигателя;  $\eta_{общ}$  — общий КПД привода, учитывающий механические потери мощности в передаточном механизме, муфте и подшипниках.

Для удобства решения дифференциального уравнения (5) неизвестной функцией считали функцию  $y(\varphi) = \omega_1^2(\varphi)$ . Таким образом, дифференциальное уравнение (5) было представлено в следующем виде:

$$\left( J_I^{np} + J_{II}^{np}(\varphi) \right) \frac{dy}{d\varphi} + \frac{dJ_{II}^{np}}{d\varphi} y = 2 \left( M_{дв}^{np}(\sqrt{y}) + M_c^{np}(\varphi) \right). \quad (6)$$

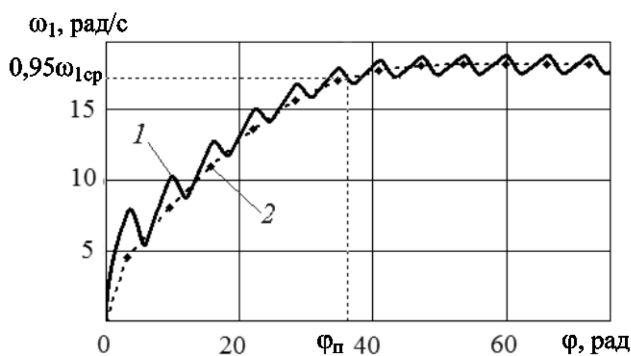
Решение дифференциального уравнения (6) при нулевых начальных условиях ( $y|_{\varphi=0} = 0$ ) в программной среде MathCAD приведено на рис. 8.



**Рис. 8.** Решение уравнения (6) движения машинного агрегата в MathCAD

**Результаты исследования.** Сначала рассмотрим результаты динамического анализа привода плунжерного насоса с заданными параметрами. На рис. 9 представлен график изменения угловой скорости  $\omega_1$  начального звена (кривая 1) от пуска до установившегося режима движения. При расчетах можно полагать, что установившийся участок движения начинается с момента, когда среднее значение угловой скорости  $\omega_1$  за один оборот кривошипа (кривая 2 на рис. 9) отличается от установившегося значения на 5 %. Расчеты показали, что за время переходного процесса начальное звено 1 (см. рис. 2) поворачивается на угол  $\varphi_{\text{п}} = 36,3$  рад. Время переходного процесса  $t_{\text{п}} = 3,8$  с. Необходимо отметить, что пуск привода выполнялся из положения, соответствующего «мертвому» положению в начале холостого хода. При изменении начального положения привода время переходного процесса изменяется.

На установившемся участке движения средняя угловая скорость  $\omega_{1\text{ср}} = 18,2$  рад/с, коэффициент неравномерности  $\delta = 0,071$ . Полученное значение  $\delta$  удовлетворяет требованиям, предъявляемым к равномерности движения плунжерного насоса:  $\delta \leq [\delta]$ .



**Рис. 9.** Изменение угловой скорости начального звена (1) и ее средние значения за один оборот (2)

Формулы (2) позволяют определить КПД  $\eta_{\text{дв}}$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_1$  двигателя при постоянном значении коэффициента скольжения  $s$ . При установившемся движении угловая скорость ротора двигателя изменяется по периодическому закону, следовательно, изменяется и коэффициент скольжения. Проведенные исследования показали, что расчет  $\eta_{\text{дв}}$  и  $\cos \varphi_1$  по среднему значению коэффициента скольжения  $s_{\text{ср}}$  приводит к значительной погрешности. По

этой причине КПД двигателя и коэффициент мощности определяли усреднением за цикл работы:

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_{2\text{ср}}}{P_{1\text{ср}}} = \frac{\int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} P_2 d\varphi}{\int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} P_1 d\varphi}; \quad (\cos\varphi_1)_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\varphi}^{\varphi+2\pi} \cos\varphi_1 d\varphi, \quad (7)$$

где  $P_2$ ,  $P_1$ ,  $\cos\varphi_1$  — полезная мощность, затраченная мощность и коэффициент мощности, определяемые по формулам (2) в зависимости от угловой скорости ротора (или коэффициента скольжения  $s$ ).

Для рассматриваемого привода получены следующие значения:  $\eta_{\text{дв}} = 0,73$ ,  $(\cos\varphi_1)_{\text{ср}} = 0,844$ , коэффициент загрузки двигателя  $\beta_{\text{ср}} = P_{2\text{ср}}/P_{2\text{н}} = 1,16$ . Рассчитанное значение КПД двигателя меньше максимального значения, которое равно  $0,785$ , поэтому передаточное отношение передаточного механизма  $U = 8$  не является оптимальным.

Теперь рассмотрим динамический синтез исследуемого привода, в ходе которого решаются две задачи:

1) нахождение приведенного момента инерции первой группы звеньев, обеспечивающего заданную неравномерность движения  $[\delta] = 1/14$ ;

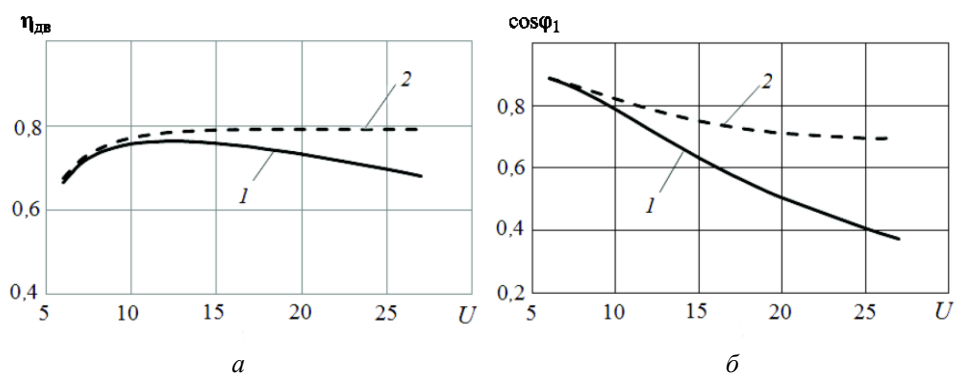
2) нахождение передаточного отношения передаточного механизма  $U$ , обеспечивающего максимальное значение КПД двигателя и высокие значения коэффициента мощности.

Первую задачу решают методом Н.И. Мерцалова [1], расчетные формулы в статье не приводятся. Коэффициент полезного действия двигателя определяют по формуле (7).

На рис. 10 представлены зависимости КПД и коэффициента мощности двигателя от передаточного отношения  $U$ . Расчеты выполнялись следующим образом. Для каждого значения передаточного отношения  $U$  передаточного механизма методом Н.И. Мерцалова вычисляли необходимый приведенный момент инерции первой группы звеньев  $J_1^{\text{пр}}$ , обеспечивающий условие  $\delta = [\delta]$ . Для полученного значения  $J_1^{\text{пр}}$  и заданного передаточного отношения  $U$  рассчитывали указанные величины.

Кривые 1 (см. рис. 10) определяли по формулам (7), кривые 2 — по формулам (2) при коэффициенте скольжения, соответствующем сред-

нему значению угловой скорости  $s_{cp} = (\omega_c - \omega_{1cp}U) / \omega_c$ . Из приведенных зависимостей видно, что вычисления КПД двигателя и коэффициента мощности по среднему значению скольжения за цикл дает значительные погрешности вычислений. Коэффициент полезного действия двигателя принимает наибольшее значение в диапазоне  $U = 11 \dots 14$ , в котором он изменяется менее чем на 0,5 % (рис. 10, а). Уменьшение передаточного отношения увеличивает коэффициент мощности двигателя (рис. 10, б), поэтому оптимальным можно считать передаточное отношение  $U = 11$ .



**Рис. 10.** Зависимость КПД (а) и коэффициента мощности (б) двигателя от передаточного отношения  $U$ :

1 — полученная по формулам (7); 2 — полученная по формулам (2) при  $s = s_{cp}$

Выбранное значение передаточного отношения  $U$  передаточного механизма привода должно обеспечивать возможность запуска двигателя из любого положения начального звена 1 (см. рис. 2). Очевидно, что это условие выполняется, если привод запускается из положения, в котором приведенный момент сопротивления принимает максимальное значение. Для рассматриваемого привода плунжерного насоса это положение соответствует следующему значению обобщенной координаты:  $\varphi = 4,75$  рад. Расчеты показали, что двигатель запустится из указанного положения только при  $U \geq 16,5$ .

Проведенные исследования выявили незначительное изменение времени пуска при увеличении передаточного отношения  $U$  от 16,5 до 22. При этом КПД двигателя уменьшится с 0,75 до 0,72, а коэффициент мощности двигателя — с 0,59 до 0,46. При  $U \geq 22$  на некоторых участках движения двигатель начинает работать в режиме генератора.

С учетом возможности запуска привода из любого положения можно рекомендовать следующие значения передаточного отношения передаточного механизма и приведенного момента инерции пер-

вой группы звеньев:  $U = 16,5$ ;  $J_I^{пр} = 42,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Полученные значения не обеспечивают оптимальную работу электродвигателя. По сравнению с оптимальной работой КПД двигателя снижен на 1,6 %, коэффициент мощности снижен на 18 %.

**Заключение.** Предложена методика динамического анализа и синтеза машинного агрегата с учетом параметров, характеризующих работу асинхронного двигателя. Методика основана на использовании Г-образной схемы замещения и не учитывает электромагнитные переходные процессы. Такое упрощение не приводит к большой погрешности вычислений, поскольку время одного цикла установившегося движения машинного агрегата и время пуска обычно значительно больше времени электромагнитных переходных процессов.

При динамическом синтезе машинного агрегата с электродвигателем предложено определять не только момент инерции дополнительной маховой массы, но и передаточное отношение передаточного механизма из условий получения максимального КПД двигателя при возможности запуска привода из любого начального положения.

Предложена аппроксимация механической характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, учитывающая увеличение пускового момента и провал механической характеристики при больших значениях коэффициента скольжения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фролов К.В., Попов С.А., Мусатов А.К. и др. *Теория механизмов и машин*. Г.А. Тимофеев, ред. 7-е изд., доп. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 586 с.
- [2] Вульфсон И.И. *Динамика цикловых машин*. Санкт-Петербург, Политехника, 2013, 425 с.
- [3] Вольдек А.И. *Электрические машины*. Ленинград, Энергия, 1974, 840 с.
- [4] Базиль Ш., Савич С.П. Энергетические показатели асинхронных электроприводов механизмов поворота. *Электрические и компьютерные системы*, 2010, № 1, с. 41–44.
- [5] Васильев Б.Ю. *Электропривод. Энергетика электропривода*. Санкт-Петербург, СОЛОН-ПРЕСС, 2015, 268 с.
- [6] Архипцев Ю.Ф., Котеленец Н.Ф. *Асинхронные электродвигатели*. Москва, Энергоатомиздат, 1986, 104 с.
- [7] Гридин В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным. *Электричество*, 2012, № 5, с. 40–44.
- [8] Фаттахов К.М., Фаттахов Р.К. Метод определения параметров схемы замещения асинхронной машины по паспортным и каталожным данным. *Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий*. Сб. ст. Уфа, УГНТУ, 2011, с. 123–131.
- [9] Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. *Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник*. Москва, Энергоиздат, 1982, 504 с.

Статья поступила в редакцию 20.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Тимофеев Г.А., Люминарский И.Е., Люминарская Е.С. Динамический анализ и синтез механизмов с учетом механической характеристики асинхронного электродвигателя. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 5.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-5-1613>

**Тимофеев Геннадий Алексеевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель Научно-учебного комплекса «Робототехника и комплексная механизация» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 публикаций. Область научных интересов: исследование, разработка и создание планетарных и волновых механизмов для высокоточных следящих систем. e-mail: [timga@bmstu.ru](mailto:timga@bmstu.ru)

**Люминарский Игорь Евгеньевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области динамики и прочности зубчатых механизмов. Автор более 25 публикаций, в том числе одной монографии. e-mail: [lie260@mail.ru](mailto:lie260@mail.ru)

**Люминарская Екатерина Станиславовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов — выявление скрытых дефектов электрических контактов. Автор 8 статей и 6 патентов на полезную модель. e-mail: [lyuminarskaja.caterina@yandex.ru](mailto:lyuminarskaja.caterina@yandex.ru)

## **Dynamic analysis and synthesis of mechanisms with consideration of mechanical characteristics of asynchronous electric moto**

© G.A. Timofeev, I.E. Lyuminarskiy, E.S. Lyuminarskaya

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The correct choice of drive parameters is a prerequisite for high-performance and economical operation of the machine set. Dynamic synthesis of electrically powered machines usually accounts only for mass and size of a flywheel which provides the given non-uniformity of movement, and the parameters characterizing the operation of the motor are not considered. This approach does not allow effective use of electrical energy. The article presents a method of dynamic analysis and synthesis of a machine set with an asynchronous electric motor, which makes it possible to explore not only the non-uniformity of movement, but also the parameters that characterize the operation of the motor: the efficiency and power factor. This technique is based on the l-section motor equivalent circuit. When conducting the dynamic synthesis of electric drive we propose to determine not only the moment of inertia of rotating mass, but also the gear ratio of the transmission mechanism according to the conditions to maximize the engine efficiency and the possibility to start the drive. We used the proposed method in dynamic analysis and synthesis of a plunger pump.*

**Keywords:** *electric drive, equivalent circuit, dynamic analysis, efficiency factor, power factor*

### REFERENCES

- [1] Frolov K.V., Popov S.A., Musatov A.K. et al. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. G.A. Timofeev, ed. 7th augmented ed. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 586 p.
- [2] Vulfson I.I. *Dinamika tsiklovykh mashin* [Dynamics of cyclic machines]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 2013, 425 p.
- [3] Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric cars]. Leningrad, Energiya Publ., 1974, 840 p.
- [4] Bazi' Sh., Savich S.P. *Elektricheskie i kompyuternye sistemy — Electrotechnic and Computer Systems*, 2010, no. 1, pp. 41–44.
- [5] Vasilev B.Yu. *Elektroprivod. Energetika elektroprivoda* [The electric drive. Power of the electric drive]. St. Petersburg, Solon-press Publ., 2015, 268 p.
- [6] Arkhiptsev Yu.F., Kotelenets N.F. *Asinkhronnye elektrodvigateli* [Asynchronous electric motors]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986, 104 p.
- [7] Gridin V.M. *Elektrichestvo — Electrical Technology Russia*, 2012, no. 5, pp. 40–44.
- [8] Fattakhov K.M., Fattakhov R.K. Metod opredeleniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoy mashiny po pasportnym i kataloghnym dannym [Method for determining the parameters of equivalent circuit of an asynchronous machine according to passport and catalog data]. *Elektroprivod, elektrotekhnologii i elektrooborudovanie predpriyatiy. Sbornik statey* [Electric drive, electrotechnology and electrical equipment of enterprises. Coll. Art.]. Ufa, Ufa State Petroleum Technological University Publ., 2011, pp. 123–131.

- [9] Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. *Asinkhronnye dvigateli serii 4A. Spravochnik* [Asynchronous motors of 4A series. Reference book]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 504 p.

**Timofeev G.A.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Head of the Scientific and Educational Complex Robotics and Integrated Mechanization, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 200 scientific papers in the field of design and computer-aided design of lever, cam, gear, planetary and wave mechanisms for various machines, instruments, stands and devices, research, development and creation of planetary wave and mechanisms for high-precision servo systems. e-mail: timga@bmstu.ru

**Lyuminarskiy I.E.**, Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University. Specialist in the field of dynamics and strength of gear mechanisms. Author of over 25 scientific publications, including one monograph. e-mail: lie260@mail.ru

**Lyuminarskaya E.S.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of the Department of Electrical and Industrial Electronics, Bauman Moscow State Technical University. The main direction of scientific research is related to identification of hidden defects in electrical contacts. Author of 8 scientific articles and 6 patents for a utility model. e-mail: lyuminarskaja.caterina@yandex.ru