

Научная статья

УДК 621.31, 621.313.33

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-13-21

Карандей Владимир Юрьевич, Афанасьев Виктор Леонидович, Карандей Юрий Юрьевич

Кубанский государственный технологический университет

*E-mail: epp_kv@mail.ru, buguvix@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СПЕЦИАЛЬНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ****Информация о статье**

Поступила:

30 августа 2023 г.

Одобрена после
рецензирования:

30 ноября 2023 г.

Принята к печати:

01 декабря 2023 г.

Опубликована:

19 декабря 2023 г.

Ключевые слова:

специальный асинхронный электрический привод, управляемый асинхронный каскадный электрический привод, преобразование энергии, математическое моделирование, электромагнитное поле, электромагнитная система

Аннотация.

В статье произведено исследование электроэнергетических процессов для оптимального моделирования и проектирования специальных электрических приводов с асинхронными двигателями. Для создания различных типов электрических приводов с оптимальными массогабаритными и энергетическими показателями необходимо точно определять значения электрических токов в обмотках, электродвижущие силы и соответствующие потокоцепления в статоре и роторе компонентов исследуемых устройств. Основной трудностью в исследовании и определении параметров является постоянное изменение этих величин вследствие изменения электрических параметров питающей системы напряжений, пространственного положения подвижных частей привода относительно неподвижных и особенностей технологического процесса. Это приводит к изменению взаиморасположения осей поля статора и ротора, фазных углов сдвига электрических токов и электродвижущих сил компонентов специальных электрических приводов. Исследование электроэнергетических процессов с использованием методов, основанных на электромеханическом преобразовании энергии, позволяет довольно точно определять искомые параметры. Определение значения накопленной энергии позволит без соответствующей экспериментальной корректировки довольно точно моделировать и проектировать специальные электрические приводы, причем данный подход позволяет определять энергетические параметры в любой момент времени, что дает возможность определять мгновенные значения искомых параметров, в том числе мгновенные значения усилия и момента на валу электрического привода. Точное и правильное определение энергетических соотношений в исследуемых электрических приводах позволит не только проводить оптимальное проектирование, но и создавать оптимальные системы управления электрическими приводами с учетом технологических особенностей конкретного производства.

Для цитирования: Карандей В.Ю., Афанасьев В.Л., Карандей Ю.Ю. Исследование электроэнергетических процессов в специальных асинхронных электрических приводах // Горное оборудование и электромеханика. 2023. № 5 (169). С. 13-21. DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-13-21, EDN: FEOWCN

Введение

Проведено исследование электроэнергетических процессов для оптимального моделирования и проектирования специальных электрических приводов с асинхронными двигателями. Специальные электрические приводы довольно широко применяются в современных технологических процессах [1-2] и производствах [3-4]. На примере специальных электрических приводов с асинхронными двигателями [5-6], конструкции которых предложены и разработаны авторами [7], была создана система

контрольных примеров. За основу была выбрана известная конструкция компонента специального электрического привода.

Для существующей конструкции специального электрического привода и его компонентов были разработаны математические модели исследуемого объекта [8-9]. Полученные математические модели позволили определить мгновенное распределение индукции в зазоре, создаваемое токами статорных обмоток, мгновенное распределение индукции в зазоре, создаваемое наведенными токами роторной

обмотки, углы между токами и напряжениями в статорных и роторных обмотках, и пространственные углы между осями полей статорной и роторной обмоток.

Полученные выражения являются основными не только при моделировании [10-11] и проектировании специальных электрических приводов [12-13], но и при создании точных и оптимальных систем управления исследуемых устройств [14-15]. Для этого необходимо знать значение накопленной устройством электромагнитной энергии в рассматриваемый момент времени [16-17]. Наиболее целесообразным подходом при определении электромагнитной энергии [18-19] является метод, основанный на электромеханическом преобразовании энергии [20]. Знание электроэнергетических процессов [21-22] в специальных электрических приводах позволит довольно точно определять параметры мгновенного усилия и момента на валу устройства [23-24], что в настоящее время является довольно трудной задачей без соответствующей экспериментальной корректировки [25-26].

Определим поток на полюсное деление τ ротора

$$\Phi = l_m \int_0^{\tau} B_c(x) dx = -l_m \int_0^{\tau} B_{\delta mc} \cos(\omega't + \frac{\pi}{\tau} x) dx = -\frac{l_m \tau}{\pi} B_{\delta mc} [\sin(\omega't + \pi) - \sin(\omega't)], \quad (1)$$

где τ – полюсное деление ротора;
 Φ – магнитный поток;
 l_m – длина магнитной части компонента электрического привода;
 B_c – индукция статора;
 $B_{\delta mc}$ – амплитуда индукции в момент максимума индукции статора на первом зубце;
 ω' – угловая частота вращения поля ротора.
 x – координата вдоль окружности ротора, отчитываемая по часовой стрелке.

Учитывая, что фазы в статоре чередуются слева направо, а фазы в роторе – справа налево, формула (1) примет вид

$$\Phi_n = -\frac{l_m \tau}{\pi} B_{\delta mc} [\sin(\omega't + \pi - \varphi_p n) - \sin(\omega't - \varphi_p n)] = -\frac{l_m \tau}{\pi} B_{\delta mc} \left[\sin(\omega't + \pi - \frac{2\pi p n}{z_p}) - \sin(\omega't - \frac{2\pi p n}{z_p}) \right], \quad (2)$$

где φ_p – угол отставания тока ротора;
 z_p – число пазов ротора.

Теперь можно определить электродвижущую силу в витке, равном полюсному делению

$$-e = \frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\omega' l_m \tau w_p}{\pi} B_{\delta mc} \left[\cos(\omega't + \pi - \frac{2\pi p n}{z_p}) - \cos(\omega't - \frac{2\pi p n}{z_p}) \right], \quad (3)$$

где z_p – число пазов ротора;
 w_p – число витков фазы ротора;
 Ψ – потокосцепление.

С учетом преобразования формулы (3) окончательно получим

$$e = \frac{2\omega' l_m \tau w_p}{\pi} B_{\delta mc} \cos(\omega't - \varphi_p n), \quad (4)$$

Определим магнитный поток, приходящийся на первую катушку фазы А

$$\Phi_{1kA} = l_m \int_0^{y\tau} B_{\delta mp}(x) dx = -l_m \int_0^{y\tau} B_{\delta mp} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \varphi_{pe}) dx = \frac{l_m \tau}{\pi} B_{\delta mp} [\cos(\omega t + \pi y - \varphi_{pe}) - \cos(\omega t - \varphi_{pe})], \quad (5)$$

где Φ_{1kA} – магнитный поток, приходящийся на первую катушку фазы А;
 $B_{\delta mp}$ – максимальное значение индукции поля ротора;
 φ_{pe} – угол между электродвижущей силой и током ротора;
 ω – угловая частота вращения поля статора;
 y – отношение шага обмотки к полюсному делению.

Определим поток, приходящийся на вторую катушку фазы А

$$\Phi_{2kA} = l_m \int_{n_{2A} \Delta x}^{y\tau + n_{2A} \Delta x} B_{\delta mp}(x) dx = -l_m \int_{n_{2A} \Delta x}^{y\tau + n_{2A} \Delta x} B_{\delta mp} \sin(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \varphi_{pe}) dx = \frac{l_m \tau}{\pi} B_{\delta mp} \left[\cos(\omega t + \pi y + \frac{\pi n_{2A} \Delta x}{\tau} - \varphi_{pe}) - \cos(\omega t + \frac{\pi n_{2A} \Delta x}{\tau} - \varphi_{pe}) \right], \quad (6)$$

где Φ_{2kA} – магнитный поток, приходящийся на вторую катушку фазы А;
 n_{2A} – число зубцовых делений сдвига второй катушки;
 Δx – длина одного зубцового деления.

Зная значение магнитного потока, можем определить электродвижущие силы катушечной группы каждой фазы. Определим электродвижущую силу, приходящуюся на первую катушку фазы А

$$e_{1kA} = \frac{\omega}{\pi} l_m \tau B_{\delta mp} \left[\sin(\omega t + \pi y - \varphi_{pe}) - \sin(\omega t - \varphi_{pe}) \right] w_k \quad (7)$$

где w_k – число витков одной катушки.

Определим электродвижущую силу, приходящуюся на вторую катушку фазы А

$$e_{2kA} = \frac{\omega}{\pi} l_m \tau B_{\delta mp} \left[\sin\left(\omega t + \pi y + \frac{\pi}{\tau} n_{2A} \Delta x - \varphi_{pe}\right) - \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} n_{2A} \Delta x - \varphi_{pe}\right) \right] w_k, \quad (8)$$

Введем понятие угла перекрытия первой и второй катушек. Это величина является универсальной и может учитывать величину перекрытия различных катушек.

$$\alpha_{nep} = \frac{\pi}{2} \left(y + \frac{n_{2A} \Delta x}{\tau} \right), \quad (9)$$

где α_{nep} – угол перекрытия первой и второй катушек.

Окончательное суммарное выражение для электродвижущих сил двух катушек с учетом угла сдвига φ_{pe} и величины угла перекрытия принимает вид

$$e_{1kA} + e_{2kA} = -2 \frac{\omega}{\pi} l_m \tau B_{\delta mp} w_k (1 + \sin \alpha_{nep}) \sin(\omega t - \varphi_{pe}) \quad (10)$$

Далее определим полный поток одного контура ротора компонента специального электрического привода. Для этого необходимо знать величины магнитных потоков, связанных с обмотками рассматриваемого компонента и электрического привода в целом. Конструкция устроена так, что катушки включены согласно. Тогда определяем поток, пересекающий поперечную плоскость катушки.

$$\Phi_{кат} = 2 \frac{i_k w_k}{R_{\mu кат}} = 2\Phi = \Phi_m \sin(\omega t), \quad (11)$$

где i_k – мгновенный ток катушки;

$R_{\mu кат}$ – магнитное сопротивление потоку катушки;

$\Phi_{кат}$ – магнитный поток катушки.

Рассмотрим уравнения электрической цепи для ротора. Важным является то, что система с двумя парами полюсов и магнитные потоки будут в каждом полюсе равны по величине и фазе и чередоваться по направлению, так как всех проводниках токи одинаковы по величине и фазе.

$$\Phi_{pf} = \frac{4 i_p w_p}{R_{\mu k}} = \frac{4 I_p w_p}{R_{\mu k}} \cos(\omega t - \varphi_{pe}), \quad (12)$$

где i_p – мгновенный ток ротора;

$R_{\mu k}$ – магнитное сопротивление потоку контура;

Φ_{pf} – магнитный поток контура.

Тогда поток от всех фаз равен

$$\begin{aligned} \Phi_{p\Sigma} = & \frac{4 I_p w_p}{R_{\mu k}} \left[\cos(\omega t - \varphi_{pe}) + \frac{8,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{2\pi}{19}) - \right. \\ & - \frac{1}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{2\pi}{19}) + \frac{7,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{4\pi}{19}) - \\ & - \frac{2}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{4\pi}{19}) + \frac{6,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{6\pi}{19}) - \\ & - \frac{3}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{6\pi}{19}) + \frac{5,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{8\pi}{19}) - \\ & - \frac{4}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{8\pi}{19}) + \frac{4,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{10\pi}{19}) - \\ & - \frac{5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{10\pi}{19}) + \frac{3,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{12\pi}{19}) - \\ & - \frac{6}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{12\pi}{19}) + \frac{2,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{14\pi}{19}) - \\ & - \frac{6}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{12\pi}{19}) + \frac{2,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{14\pi}{19}) - \\ & - \frac{7}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{14\pi}{19}) + \frac{1,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{16\pi}{19}) - \\ & - \frac{8}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{16\pi}{19}) + \frac{0,5}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{18\pi}{19}) - \\ & \left. - \frac{9}{9,5} \cos(\omega t - \varphi_{pe} - \frac{18\pi}{19}) \right], \quad (13) \end{aligned}$$

где $\Phi_{p\Sigma}$ – суммарный магнитный поток ротора.

Используя тригонометрические преобразования, окончательно получим

$$\Phi_{p\Sigma} = \frac{4 I_p w_p}{R_{\mu k}} \left[4 \frac{5}{14} \cos(\omega t - \varphi_{pe}) - \frac{1}{24} \sin(\omega t - \varphi_{pe}) \right]. \quad (14)$$

Формула (14) является выражением для определения полного магнитного потока, связанного с одним контуром беличьей клетки ротора компонента специального электрического привода.

Определим полный магнитный поток одной катушечной группы компонента специального электрического привода. Для выбранной статорной обмотки на сорок восемь пазов с двумя парами полюсов [18] вычислим магнитные потоки от всех катушек, связанные с катушкой номер один первой катушечной группы фазы А. Складывая полученные выражения, определим полный поток первой катушки первой катушечной группы фазы А.

$$\begin{aligned} \Sigma \Phi_{\text{кам}1.1A} &= \Phi_m [\sin(\omega t) + \frac{7}{9} \sin(\omega t) + \frac{1}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - \\ &- \frac{5}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - \frac{7}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) + \frac{1}{9} \sin(\omega t + 240^\circ) + \\ &+ \frac{3}{9} \sin(\omega t + 240^\circ) - \frac{5}{9} \sin(\omega t + 240^\circ) - \frac{3}{9} \sin(\omega t + 240^\circ)] = \\ &= \Phi_m [1 \frac{7}{9} \sin(\omega t) - 1 \frac{2}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - \frac{4}{9} \sin(\omega t + 240^\circ)] \end{aligned} \quad (15)$$

Потокосцепление рассматриваемой катушки равно

$$\Psi_{\text{кам}1.1A} = \Phi_m w_{\text{кам}} [1 \frac{7}{9} \sin(\omega t) - 1 \frac{2}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - \frac{4}{9} \sin(\omega t + 240^\circ)]. \quad (16)$$

Определим магнитный поток второй катушки первой катушечной группы фазы А.

$$\begin{aligned} \Sigma \Phi_{\text{кам}1.2A} &= \Phi_m [1 \frac{7}{9} \sin(\omega t) - \frac{4}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - \\ &- 1 \frac{2}{9} \sin(\omega t + 240^\circ)]. \end{aligned} \quad (17)$$

Потокосцепление рассматриваемой катушки равно

$$\Psi_{\text{кам}1.2A} = \Phi_m w_{\text{кам}} [1 \frac{7}{9} \sin(\omega t) - \frac{4}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - 1 \frac{2}{9} \sin(\omega t + 240^\circ)]. \quad (18)$$

Суммарное потокосцепление первой катушечной группы фазы А равно

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{кам}gp1A} &= \Phi_m w_{\text{кам}} [\frac{32}{9} \sin(\omega t) - \frac{15}{9} \sin(\omega t + 120^\circ) - \\ &- \frac{15}{9} \sin(\omega t + 240^\circ)], \end{aligned} \quad (19)$$

где $\Psi_{\text{кам}gp1A}$ – суммарное потокосцепление первой катушечной группы фазы А.

Произведем тригонометрические преобразования. В результате формула (19) принимает вид.

$$\begin{aligned} \Psi_{\text{кам}gp1A} &= \Phi_m w_{\text{кам}} \left\{ \frac{32}{9} \sin(\omega t) - \frac{15}{9} [-\sin(\omega t)] \right\} = \\ &= 5 \frac{2}{9} \Phi_m w_{\text{кам}} \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (20)$$

Потокосцепление для второй катушки будет аналогичным формуле (20).

Зная выражения, полученные по формулам (1) – (20) можем вычислить значение запасенной энергии в устройстве. Для этого определим выражение для магнитной индукции.

$$B_{\Sigma}^2 = \left(-B_{\delta mc} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \varphi_{ce}\right) - B_{\delta mp} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \varphi_{pe}\right) \right)^2, \quad (21)$$

где $B_{\delta mc}$ – максимальное значение индукции поля статора;

φ_{ce} – угол между напряжением и током статора.

Энергия определяется интегрированием формулы (21) по поверхности зазора.

$$\begin{aligned} W_{EM} &= \frac{2 \delta l_m}{2 \mu_0} = \int_0^{2\tau} A^2 \cos^2(\alpha) + \\ &+ 2AB \cos(\alpha) \sin(\beta) + B^2 \sin^2(\beta), \end{aligned} \quad (22)$$

где $A = -B_{\delta mc}$;

$B = -B_{\delta mp}$;

$\alpha = \omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \varphi_{ce}$;

$\beta = \omega t + \frac{\pi}{\tau} x - \varphi_{pe}$;

Окончательно формула (22) принимает значение.

$$W_{EM} = \frac{\delta l_m \tau}{\mu_0} (B_{\delta mc}^2 + B_{\delta mp}^2 - 2B_{\delta mc} B_{\delta mp} \sin(\varphi_{pe} - \varphi_{ce})), \quad (23)$$

Проводя исследования электроэнергетических процессов в специальных электрических приводах с асинхронными двигателями, можно определить значения мгновенного усилия и момента на валу.

Для этого объем системы представляется в виде характерных элементарных объемов. В каждом объеме определяется энергия по формуле (23). Все элементарные значения суммируются и определяется суммарная электромагнитная энергия всего устройства в данный момент времени и для данного пространственного расположения ротора относительно статора.

Так как распределение индукции в зазоре строится с помощью разработанных программ расчета и нет аналитического выражения этой зависимости, то для определения усилия используем численное дифференцирование частной производной энергии W_x по координате перемещения по поверхности ротора x . Учитывая, что зависимость $W(s)$ является достаточно гладкой, Рис. 1, для нахождения производной применяем трехточечный шаблон, дающий хорошую точность численного дифференцирования.

Будем рассматривать точки $x+\Delta x$, x и $x-\Delta x$. При этом Δx можно взять достаточно малой величиной. Рассматриваем любой момент времени, когда оси полей статора и ротора расположены со сдвигом друг относительно друга. Находим положения осей, суммарное распределение $B(x)$, и запасенную энергию W_x , смещая ось поля ротора в точку $-\Delta x$, что соответствует отставанию ротора и увеличению скольжения s . Это следует из того, что поле движется справа налево. Ротор движется в ту

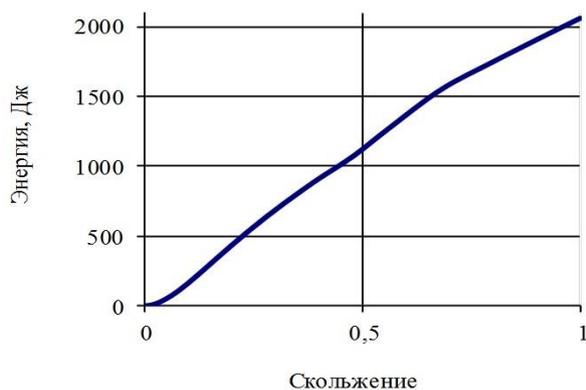


Рис. 1. График зависимости энергии от скольжения
Fig. 1. Graph of energy versus slip

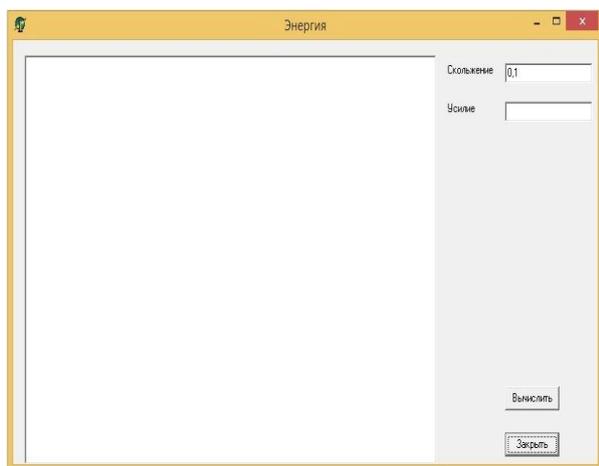


Рис. 2. Ввод данных
Fig. 2. Data input

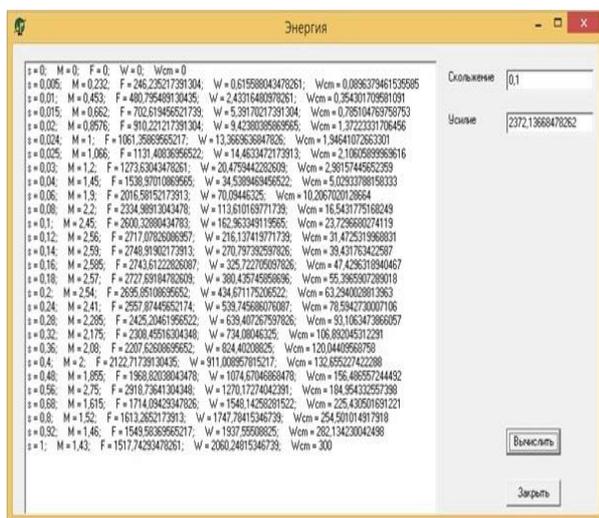


Рис. 3. Получение результата вычислений
Fig. 3. Getting the calculation result

же сторону. Точка $-Dx$ будет соответствовать отставанию ротора. Для точки $-Dx$ определяем суммарное распределение $B(x)$ и соответствующую запасенную энергию W_{x-Dx} . Смеща ось поля ротора в точку $+Dx$, что соответствует опережению ротора и уменьшению скольжения, повторяем те же вычисления и находим соответствующую энергию W_{x+Dx} . Результаты вычисления показаны на Рис. 2 и Рис. 3.

Вычисления можно производить для любого момента времени, т.е. для любого угла поворота ротора относительно статора. С помощью разработанных программ расчета получаем мгновенное значение силы и момента, действующего на вал электрического привода, за полный оборот вала.

Заключение

Проведено исследование электроэнергетических процессов для оптимального моделирования и проектирования специальных электрических приводов с асинхронными двигателями. Получены результаты, позволяющие осуществить математическое моделирование электромеханических процессов, происходящих в электрических приводах и их компонентах. Получены взаимозависимости в пространстве и во времени магнитных потоков, напряжений, электрических токов, электродвижущих сил самоиндукции и взаимной индукции в статорных и роторных обмотках компонентов исследуемых устройств. Это в свою очередь позволило определить электромагнитную энергию, запасенную в устройстве. Проведенный анализ показал, что рассчитанные с помощью разработанных программ электроэнергетические и электромеханические параметры получены с высокой точностью и совпадают с контрольным примером и с паспортными данными существующих устройств. Это позволяет использовать новые теоретические подходы для проектирования и моделирования разрабатываемых специальных систем асинхронного электрического привода и его компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козярук А. Е. Современные эффективные электроприводы производственных и транспортных механизмов // Электротехника. 2019. № 3. С. 33–37.
2. Shvidchenko D. V. [et al.] Electrical drives of continuous casting machine withdrawal rolls: a model and practical implementation of limitations on longitudinal forces in billets // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Т. 108. № 1–2.
3. Лот Н. С., Осипов О. И., Жидков А. М. Перспективы развития электроприводов шахтных подъемных установок. // Приводы и компоненты машин. 2016. № 6 (22). С. 9–12.
4. Карандаев А. С. [и др.] Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 3. С. 24–35.
5. Карандей В. Ю., Попов Б. К. Управляемый каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом // Патент на изобретение № 2461947 зарегистрировано 20.09.2012 г.
6. Карандей В. Ю., Попов Б. К., Попова О. Б. Аксиальный каскадный электрический привод с жидкостным токосъемом // Патент на изобретение № 2483415, зарегистрировано 11.03.2013 г.
7. Афанасьев В. Л., Карандей В. Ю., Попов Б. К. Управляемый каскадный электрический привод // Патент на полезную модель RU 191959 U1, 28.08.2019, заявка № 2019111630 от 16.04.2019.

8. Шохин В. В. [и др.] Моделирование системы векторного управления асинхронным двигателем с преобразованием координат электропривода // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 1 (54). С. 29–37.
9. Кулинич Ю. М., Шухарев С. А., Каминский А. В., Коваленко С. В. Методика определения параметров асинхронного двигателя. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2021. Т. 64. № 1. С. 30–36.
10. Анучин А. С., Ханова Ю. М., Гуляев И. В. Разработка метода быстрого и точного моделирования электроприводов. // *Промышленная энергетика*. 2016. № 4. С. 28–33.
11. Сериков А. В., Суздорф В. И. Моделирование электромагнитных процессов в коллекторных электродвигателях с питанием от статических преобразователей. // *Электротехника*. 2016. № 12. С. 39–44.
12. Косматов В. И. [и др.] Исследование нагрузочных режимов электроприводов с асинхронным двигателем с двумя обмотками на статоре // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 2 (39). С. 12–17.
13. Крюков О. В. [и др.] Системы интеллектуального электропривода переменного тока с релейными регуляторами и адаптивными корректирующими устройствами. Монография. Вологда, 2022. 140 с.
14. Лукьянов С. И. [и др.] Система управления электроприводом размоточного аппарата стана по производству высокопрочной арматуры. Монография, 2022, Москва: Вологда. 136 с.
15. Дерюжкова Н. Е., Соловьев В. А., Тетерин В. В., Урасов Д. В. Сравнительная оценка классических и нечетких алгоритмов управления системой электропривода многоточечного формования изделий двойной кривизны // *Омский научный вестник*. 2020. № 2 (170). С. 52–57.
16. Али Салама А. А., Андреев Н. К. Исследование эффективности работы пропорционально-интегрального и нейросетевого регуляторов при косвенном векторном управлении асинхронным двигателем по модели потока статора // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2012. № 3–4. С. 101–108.
17. Лукьянов С. И. [и др.] Система управления и диагностирования электропривода отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки. Монография. 2020, Москва. 240 с.
18. Корнилов В.Ю., Цветков А.Н., Мухаметшин А.И. Исследование процесса электромагнитного преобразования энергии в асинхронном двигателе с комбинированной двухслойной обмоткой. // *Нелинейный мир*. 2017, № 6. С. 33–39.
19. Байрамкулов К. Н. А., Астахов В. И. Расчет магнитного поля в среде с неоднородными и анизотропными свойствами на основе электрической цепи кирхгофа. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2010, № 1. С. 3–11.
20. Иванов С. Н., Ким К. К., Приходченко О. В., Просолович А. А. Теоретические основы математического моделирования процессов преобразования мощности в совмещенных энергетических устройствах. // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. 2020. Т. 1. № 1 (41). С. 37–44.
21. Мугалимов Р. Г. [и др.] Исследование пускового момента и механической характеристики асинхронного двигателя для электропривода безредукторного волоочильного стана // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2019. Т. 19. № 1. С. 93–101.
22. Blagodarov D. A., Safonov Y. M., Grigorian D. D., Khrumshin V. R. Limiting dynamic loads of electric drive with flexible couplings and variable inertia moment // *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2018*. Pp. 582–584, 2018. Publisher: IEEE, doi: 10.1109/ElConRus.2018.8317165.
23. Даньшина А. А. [и др.] Методы и способы совершенствования электромеханических систем силокомпенсирующих манипуляторов. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2021. Т. 64. № 1. С. 69–76.
24. Власьевский С. В., Малышева О. А., Мельниченко О. В. Сравнение расчетных сил тяги по сцеплению электровозов переменного тока с асинхронным и коллекторным приводом // *Электроника и электрооборудование транспорта*. 2018. № 5. С. 30–36.
25. Зюзев А. М., Метельков В. П. О проблеме перегрева обмотки ротора асинхронных двигателей в пусковых режимах высокоинерционных электроприводов нефтегазовой и горной промышленности. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 7. С. 96–103.
26. Карандаев А. С. [и др.] Экспериментальное определение параметров двухмассовой электромеханической системы прокатного стана // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. 2021. Т. 64. № 3. С. 24–35.

© 2023 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Карандей Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кандидат технических наук, доцент, erp_kvuy@mail.ru

Афанасьев Виктор Леонидович, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), старший преподаватель, buguvix@mail.ru

Карандей Юрий Юрьевич, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), кyu1479@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Карандей В.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Афанасьев В.Л. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Карандей В.Ю. – постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-13-21

Vladimir Yu. Karandey, Viktor L. Afanasiev, Yuriy Yu. Karandey

Kuban State Technological University

*E-mail: epp_kvj@mail.ru, buguvix@mail.ru

RESEARCH OF ELECTRIC POWER PROCESSES IN SPECIAL ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES



Article info

Received:

30 August 2023

Accepted for publication:

30 November 2023

Accepted:

01 December 2023

Published:

19 December 2023

Keywords: special asynchronous electric drive, controlled asynchronous cascade electric drive, energy conversion, mathematical modeling, electromagnetic field, electromagnetic system.

Abstract.

The article research power processes for optimal modeling and design of special electric drives with asynchronous motors. In order to create various types of electric drives with optimal weight and size and energy indicators, it is necessary to accurately determine the values of electric currents in the windings, electromotive forces and corresponding flux couplings in the stator and rotor of the components of the devices under study. The main difficulty in research and determining the parameters is the constant change of these values as a result of the change in the electrical parameters of the supply voltage system, the spatial position of the movable parts of the drive relative to the stationary ones and the features of the technological process. This leads to a change in the mutual location of the stator and rotor field axes, phase shear angles of electric currents and electromotive forces of components of special electric drives. The research of electric power processes using methods based on electromechanical energy conversion allows you to quite accurately determine the parameters you are looking for. Determining the value of stored energy will allow you to model and design special electrical drives quite accurately without appropriate experimental adjustment. Besides, this approach allows determining energy parameters at any moment of time, which makes it possible to determine instantaneous values of the desired parameters, including instantaneous values of force and torque on the shaft of the electric drive. Accurate and correct determination of energy ratios in the studied electric drives will allow not only to carry out optimal design, but also to create optimal control systems for electric drives taking into account the technological features of a particular production.

For citation: Karandey V.Yu., Afanasiev V.L., Karandey Yu.Yu. Research of electric power processes in special asynchronous electric drives. Mining Equipment and Electromechanics, 2023; 5(169):13-21 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2023-5-13-21, EDN: FEOWCN

REFERENCES

1. Kozyaruk A.E. Modern effective electric drives of production and transport mechanisms. *Electrotechnika*. 2019; 3:33–37.
2. Shvidchenko D.V. [et al.] Electrical drives of continuous casting machine withdrawal rolls: a model and practical implementation of limitations on longitudinal forces in billets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020; 108:1–2.
3. Lot N.S., Osipov O.I., Zhidkov A.M. Future prospects of winder electric drives. *Drives and components of machines*. 2016; 6 (22):9–12.
4. Karandaev A.S. [et al.] Experimental determination of parameters of a two-mass electromechanical system of a rolling mill. *Izvestia of higher educational institutions. Electromechanics*. 2021; 64(3):24–35.
5. Karandey V.Yu., Popov B.K. The operated cascade electric drive with a liquid tokosjem. Patent for the invention No. 2461947 is registered 9/20/2012.
6. Karandey V.Yu., Popov B.K., Popova O.B. The axial cascade electric drive with a liquid tokosjem. Patent on the invention No. 2483415 is registered 3/11/2013.
7. Afanasyev V.L., Karandey V.Yu., Popov B.K. The controlled cascade electric drive. Patent for utility model № RU 191959 U1, is registered 28.08.2019, application No 2019111630 here 16.04.2019.
8. Shokhin V.V. [et al.] Modeling of the vector control system of an asynchronous motor with the transformation of the coordinates of the electric drive. *Electrical systems and complexes*. 2022; 1(54):29–37.
9. Kulinich Y.M., Shuharev S.A., Kaminsky A.V., Kovalenko S.V. Method for determining the parameters of an induction motor. *News of higher educational institutions. Electromechanics* 2021; 64(1):30–36.
10. Anuchin A.S., Hanova Yu.M., Gulyaev I.V. Development of the method of fast and exact modeling of electric drives. *Industrial power*. 2016; 4:28–33.
11. Serikov A.V., Suzdorf V.I. Modeling of electromagnetic processes in collector motors powered by static converters. *Electrical engineering*. 2016; 12:39–44.
12. Kosmatov V.I. [et al.] Study of load modes of electric drives with an asynchronous motor with two windings on a stator. *Electrotechnical systems and complexes*. 2018; 2(39):12–17.
13. Kryukov O.V. [et al.] Systems of intelligent AC electric drive with relay regulators and adaptive correcting devices. Monograph. Vologda. 2022, 140 p.
14. Lukyanov S.I. [et al.] Electric drive control system of the winding apparatus of the high-strength reinforcement mill. Monograph. 2022. Moscow: Vologda. 136 p.
15. Deryuzhkova N.E., Solovyev V.A., Teterin V.V., Urasov D.V. Comparative evaluation of classic and fuzzy control algorithms for electric drive system of multi-point molding of products of double curvature. *Omsk Scientific Bulletin*. 2020; 2(170):52–57.
16. Ali Salama A.A., Andreev N.K. Study of effectiveness of pi and neural network speed controllers in indirect vector control of induction motor using stator flux model. *News of higher educational institutions. Power problems*. 2012; 3(4):101–108.
17. Lukyanov S.I. [et al.] Control and diagnostics system of the electric drive of the outgoing roller table of the broadband hot rolling mill. Monograph. 2020. Moscow. 240 p.
18. Kornilov V.U., Tsvetkov A.N., Muchametshin A.I. Investigation of the process of electromagnet-ic energy conversion in an asynchronous motor with a combined two-layer winding. *Nonlinear world*. 2017; 6:33–39.
19. Bayramkulov K.N., Astakhov V.I. Calculation of magnetic field in the environment with non-uniform and anisotropic properties on the basis of the electric chain of Kirchhoff. *News of higher educational institutions. Electromechanics*. 2010; 1:3–11.
20. Ivanov S.N., Kim K.K., Prihodchenko O.V., Prosolovich A.A. Theoretical foundations of mathematical modeling of power conversion processes in combined power devices. *Scientific notes of Komsomolsky-on-Amur State Technical University*. 2020; 1(41):37–44.
21. Mugalimov R.G. [et al.] Research of starting torque and mechanical characteristics of an asynchronous motor for electric drive of a reducerless drawing mill. *Bulletin of South Ural State University. Series: Energy*. 2019; 19(1):93–101.
22. Blagodarov D.A., Safonov Y.M., Grigorian D.D., Khramshin V.R. Limiting dynamic loads of electric drive with flexible couplings and variable inertia moment. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus*. 2018. Pp. 582–584. Publisher: IEEE, doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317165.
23. Danshina A.A. [et al.] Methods and methods of improving electromechanical systems of force-compensating manipulators. *Izvestia of higher educational institutions. Electromechanics*. 2021; 64(1):69–76.
24. Vlasyevskiy S.V., Malysheva O.A., Melnichenko O.V. Comparison of calculation traction forces on the adhesion of ac electric locomotives with an asynchronous and collector drives. *Electronics and electric equipment of transport*. 2018; 5:30–36.
25. Zyuzev A.M. [et al.] On the problem of overheating of the rotor winding of asynchronous motors in the starting modes of high-inertial electric drives of the oil and gas and mining industries. *Izvestia of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2018; 329(7):96–103.
26. Karandaev A.S. [et al.] Experimental determination of parameters of a two-mass electromechanical system of a rolling mill. *Izvestia of higher educational institutions. Electromechanics*. 2021; 64(3):24–35.

The author declares no conflict of interest.

About the author:

Vladimir Yu. Karandey, head of the department of power supply of industrial enterprises, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), C. Sc. in Engineering, Associate Professor, epp_kv@mail.ru

Viktor L. Afanasiev, Senior Lecturer, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), buguvix@mail.ru

Yuriy Yu. Karandey, graduate student department of power supply of industrial enterprises, Kuban State Technological University (350072, Russia, Krasnodar, Moskovskaya str., 2), kyy1479@mail.ru

Contribution of the authors:

Vladimir Yu. Karandey – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Viktor L. Afanasiev – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Yuriy Yu. Karandey – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualization of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

Author have read and approved the final manuscript.

