

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД АНТЕННЫ РАДИОЛОКАТОРА  
СЕКТОРНОГО ОБЗОРА В РЕЖИМЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ**В. О. Нагорный<sup>1</sup>, А. В. Аристов<sup>2\*</sup><sup>1</sup>АО «Научно-производственный центр «Полюс»  
Российская Федерация, 634041, г. Томск, просп. Кирова, 56в<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
Российская Федерация, 634034, г. Томск, просп. Ленина, 30

\*E-mail: parist@sibmail.com

*Предметом исследования является принцип формирования режима пульсирующего движения для управления электроприводом антенны радиолокационной станции секторного обзора, основанный на фазной модуляции питающих напряжений двухфазного асинхронного двигателя с прерыванием одного из них тогда, когда электромагнитный момент переходит через ноль.*

*Цель работы – получение расчетных соотношений, позволяющих установить связь между выходными параметрами электропривода и параметрами исполнительного двигателя, источников питания и нагрузки при потенциальной фазовой модуляции.*

*Разработана методика расчета электропривода с пульсирующим законом движения, основанная на решении системы уравнений в операторной форме, описывающих обобщенную электрическую машину, методом Крамера относительно токов фаз асинхронного двигателя. С использованием полученных токов фаз обобщенной электрической машины вычисляется электромагнитный момент. Следующий шаг состоит в том, что из электромагнитного момента выделяются пусковая и демпфирующая составляющие. Далее решается уравнение движения относительно перемещения подвижного элемента, позволяющее связать указанные токи с выходными параметрами электропривода, для чего служит метод гармонического баланса.*

*В результате исследований получены инженерные расчетные соотношения, которые дают возможность установить взаимосвязь между электромагнитным, пусковым, демпфирующим моментами электропривода, скоростью, перемещением и параметрами исполнительного двигателя, источников питания и нагрузки при потенциальной фазовой модуляции. Проведен сравнительный анализ результатов аналитического решения и математического моделирования электропривода в программной среде MATLAB. По итогам анализа сделан вывод о том, что расхождение между рассчитанными токами фаз асинхронного двигателя и результатами математического моделирования электропривода не превышает 2 %. В свою очередь, разница между результатами расчета и математического моделирования для электромагнитного момента и перемещения подвижного элемента электропривода не превышает 3 и 6 % соответственно. Таким образом, высокая сходимость расчетных данных с результатами моделирования позволяет говорить о правомочности применения разработанной методики для определения выходных параметров асинхронных электроприводов с пульсирующим законом движения.*

*Ключевые слова: радиолокационная станция, фазовая модуляция, пульсирующий режим работы, асинхронный двухфазный электродвигатель, электропривод антенны.*

Vestnik SibGAU  
Vol. 16, No. 1, P. 97–103**CONTROLLING TWO-PHASE ASYNCHRONOUS DRIVE OF RADAR ANTENNA  
OF SECTOR REVIEW IN PULSATING MOTION MODE**V. O. Nagorniy<sup>1</sup>, A. V. Aristov<sup>2\*</sup><sup>1</sup>SC “Scientific&Industrial Centre “Polyus”  
56v, Kirov Av., Tomsk, 634041, Russian Federation<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Av., Tomsk, 634034, Russian Federation

\*E-mail: parist@sibmail.com

*The object of the research is the formation principle of the pulsating movement mode for control of the electric drive of the antenna of the radar station of the sector review based on the phase modulation of power voltages of the two-phase asynchronous engine with interruption of one of them in time points when the electromagnetic moment crosses zero.*

The purpose of the given research is to receive the estimated ratios that make it possible to establish connection between the output parameters of the electric drive and parameters of the executive engine, power supplies and loadings in case of the potential phase shift keying.

The authors of the article developed the method of calculation of the electric drive with the pulsating law of movement based on the solution of system of equations in the operating form that are to describe the generalized electrical machine by using Cramer's method concerning currents of phases of the asynchronous engine. Using the received currents of phases of the generalized electrical machine, the electromagnetic moment is calculated. The next step is that the starting and damping components are singled out from the electromagnetic moment. Then the motion equation permitting to connect the received currents with the output parameters of the electric drive is solved. To solve the motion equation concerning the relocation of a mobile element the method of harmonic balance is used.

As a result of researches engineering estimated ratios which permit to establish the correlation between the electromagnetic, starting, damping electric drive moments, speed, relocation and parameters of the executive engine, power supplies and loadings in case of potential phase shift keying are received. In the article the comparative analysis of results of the analytical solution and mathematical simulation of the electric drive is provided in a software environment of MATLAB. On the basis of the performed analysis the authors of the article come to the conclusion that the discrepancy between the currents of the phases of the asynchronous engine received as a result of the calculation and the results of mathematical simulation of the electric drive doesn't exceed 2 %. In turn, the discrepancy between the results of the calculation and the mathematical simulation for the electromagnetic moment and the relocation of a mobile element of the electric drive doesn't exceed 3 % and 6 % respectively. The authors of the research also stress that the high accuracy of convergence of the results of the calculation with the results of the simulation allows us to speak about competency of the application of the received calculation procedure for determining the output parameters of asynchronous electric drives with the pulsating law of movement.

**Keywords:** radar, phase modulation, pulsed mode, two-phase asynchronous electric motor, electric antenna.

**Введение.** Известно, что принцип действия радиолокационных станций заключается в облучении радиоволнами объекта и приеме отраженного от него сигнала. Генерируемый станцией электромагнитный импульс излучается антенной в каком-либо направлении. По задержке отраженного сигнала можно вычислить расстояние до объекта, а по положению антенны – направление на него. Ориентацию электромагнитного луча, формируемого антенной, можно изменить поворотом антенны в нужном направлении [1]. Во время работы антенна сканирует окружающее пространство по заданному закону в соответствии с текущим режимом. Согласно блок-схеме радиолокатора (рис. 1) источники питания обеспечивают электроэнергией все его блоки и узлы, устройство контроля управляет приемопередатчиком в соответствии с выбранным на пульте управления режимом работы. Вся получаемая информация отображается индикатором секторного обзора. В состав антенного блока входят два электропривода – азимута и угла места антенны, а также схемы управления ими.

В азимутальном приводе антенны радиолокатора для получения пульсирующего движения антенны

обычно используются серийный электродвигатель постоянного тока и специальный редуктор [2]. Однако наличие редуктора вносит дополнительную погрешность в определение направления на объект и существенно снижает частоту сканирования.

Уменьшить данные недостатки и существенно расширить динамический диапазон работы можно с помощью привода, построенного на базе двухфазного асинхронного электродвигателя (АД), действующего непосредственно в режиме периодического движения за счет фазной модуляции питающих напряжений с прерыванием одного из них тогда, когда электромагнитный момент АД переходит через ноль [3].

Электроприводами периодического движения в разное время занимались как российские, так и зарубежные ученые. Большой вклад в эту область внесли В. И. Луковников [4], Б. А. Ивоботенко [5], С. А. Грачев [6; 7], Со Лин Аунг [8], С. А. Ткалич, Ф. А. Мамедов, М. Г. Чиликин, В. Я. Беспалов, В. А. Постников, А. П. Балкова, Р. J. Lawtenson, М. R. Harris. Однако в их трудах не рассматривался пульсирующий режим работы асинхронного электропривода при потенциальной фазовой модуляции.

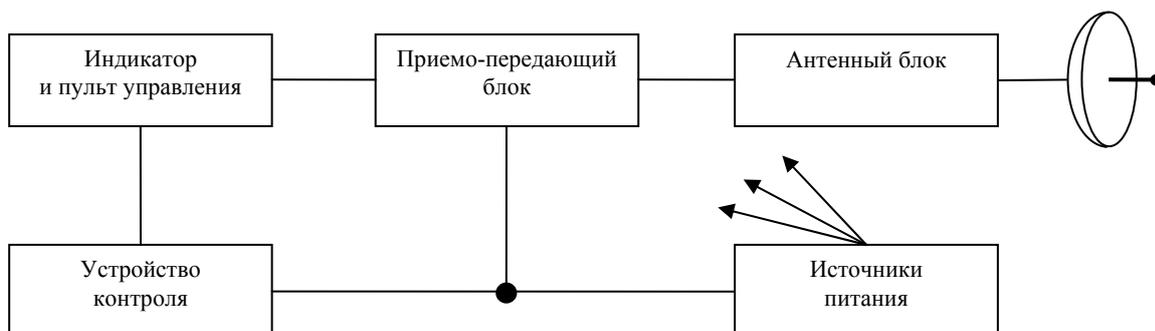


Рис. 1. Блок-схема радиолокационной станции секторного обзора

**Теоретическая часть.** При исследовании периодических режимов удобно представить электрическую машину в виде некоей идеализированной обобщенной модели с двумя парами взаимоперпендикулярных обмоток – на первичном и вторичном элементах [9], что позволяет при определенных допущениях проанализировать наибольшее число различных типов АД, работающих в режиме пульсирующего движения.

Для данной модели возможны несколько вариантов записи системы описывающих ее дифференциальных уравнений. Наиболее просто анализируются уравнения, записанные в координатных осях  $\alpha, \beta$  или  $d, q$ , жестко связанных со статором или ротором соответственно. Так, например, приведение к осям  $\alpha, \beta$  позволяет существенно упростить математическое описание процессов, исключив периодические коэффициенты в уравнениях, описывающих электрическое состояние в статорных обмотках АД.

При общепринятых допущениях (магнитопровод машины не насыщен, магнитные потоки синусоидально распределены в пространстве, вихревые токи и краевые эффекты пренебрежимо малы) [10] модель обобщенного электродвигателя, работающего в режиме пульсирующего движения, в системе координат  $\alpha, \beta$  описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha s}(t) &= i_{\alpha s} R_{\alpha s} + L_{\alpha s} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + M_{\alpha} \frac{di_{\omega r}}{dt}; \\ U_{\beta s}(t) &= i_{\beta s} R_{\beta s} + L_{\beta s} \frac{di_{\beta s}}{dt} + M_{\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt}; \\ 0 &= i_{\omega r} R_r + L_r \frac{di_{\omega r}}{dt} + \\ &+ M_{\alpha} \frac{di_{\alpha s}}{dt} - \omega (M_{\beta} i_{\beta s} + L_r i_{\beta r}); \\ 0 &= i_{\beta r} R_r + L_r \frac{di_{\beta r}}{dt} + M_{\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \\ &+ \omega (M_{\alpha} i_{\alpha s} + L_r i_{\omega r}); \\ M_{\text{эм}} &= k_d (M_{\alpha} i_{\alpha s} i_{\beta r} - M_{\beta} i_{\beta s} i_{\omega r}) = \\ &= M_H \left( \int \omega dt, \omega, \frac{d\omega}{dt} \right), \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $U_{\alpha s}(t), U_{\beta s}(t), i_{\alpha s}, i_{\beta s}, i_{\omega r}, i_{\beta r}$  – напряжения и токи фазных обмоток;  $R_{\alpha s}, R_{\beta s}, R_r, L_{\alpha s}, L_{\beta s}, L_r$  – активные сопротивления и полные индуктивности фазных обмоток;  $M_{\alpha}, M_{\beta}$  – взаимоиנדуктивности между статорными и роторными обмотками по координатным осям  $\alpha, \beta$ ;  $\omega$  – скорость изменения обобщенной координаты подвижного элемента;  $M_{\text{эм}}, M_H$  – обобщенные электромагнитное усилие и нагрузка;  $k_d$  – обобщенный силовой коэффициент.

Для угловых движений  $k_d = 1$ , а для прямолинейных  $k_d = \pi^2/\tau^2$ ; где  $\tau$  – полусное деление.

При реализации пульсирующего режима работы АД может быть использован в качестве управляемого источника пульсирующего перемещения или усилия

в зависимости от того, осуществляется ли питание его обмоток от источника напряжения или тока [11].

Так, при потенциальном питании АД можно в системе уравнений (1) считать заданными фазные напряжения и неизвестным закон движения подвижного элемента двигателя, а при токовом питании – фазные токи и, соответственно, развиваемое двигателем электромагнитное усилие. Для азимутального привода антенны основным выходным параметром является закон движения, поэтому рассмотрим работу АД только при потенциальной модуляции фазных напряжений.

Очевидно, что система (1) является системой дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами, точное аналитическое решение которой найти невозможно. Однако если частота пульсаций вала исполнительного двигателя  $\Omega$  не менее чем на порядок меньше циклической частоты питающей сети  $\omega_c$  ( $\Omega \ll \omega_c$ ), то можно считать в первых четырех уравнениях системы  $\omega = \text{const}$  [7]. При этом уравнения становятся линейными, и аналитическое решение для токов при установившемся режиме работы можно найти, применяя теорему разложения [12] с учетом характеристических корней функций регулирования:

$$i_n(t) = \sum_{l=1}^4 \sum_{h=1}^m \frac{q_l(p_h) a_{ln}(p_h) e^{p_h t}}{(Q_l'(p_h) \det(A(p_h)) + \det(A(p_h)) Q_l(a_n))}, \quad (2)$$

где  $n$  принимает значения 1, 2, 3, 4;  $i_1(t) = i_{\alpha s}(t), i_2(t) = i_{\beta s}(t), i_3(t) = i_{\omega r}(t), i_4(t) = i_{\beta r}(t)$  – фазные токи;  $q_l(P), Q_l(P)$  – операторные полиномы  $s$ -й и  $m$ -й степени питающих фазных напряжений  $U_l(P) = q_l(P)/Q_l(P)$ , причем  $m > s$ ;  $a_{ln}$  – минор  $l$ -го элемента  $n$ -го столбца операторного определителя первых четырех уравнений системы (1);  $\det(A)$  – детерминант системы (1);  $p_h$  – корни полиномов  $Q_l(P), \det(A)$ .

Система уравнений (2) позволяет путем простой подстановки возмущающего воздействия и параметров электрической машины определить фазные токи АД для различных частных случаев.

Пятое уравнение системы (1) – уравнение пульсирующего движения вторичного элемента АД – представляет собой нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка. Обобщенная нагрузка на валу двигателя является здесь сложной функцией параметров нагрузки привода и его движения.

Наиболее часто на практике нагрузка электропривода антенны радиолокатора является совокупностью позиционных и инерционных сил, а также сил жидкого и сухого трения:

$$M_H = L_{\text{мех}} \frac{d^2 \chi}{dt} + R_{\text{мех}} \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}} \chi + M_{\text{тр}},$$

где  $L_{\text{мех}}$  – коэффициент инерционной составляющей;  $R_{\text{мех}}$  – коэффициент демпфирующей (жидкое трение) составляющей;  $C_{\text{мех}}$  – коэффициент позиционной составляющей;  $M_{\text{тр}}$  – коэффициент трения.

Пренебрегая составляющей сухого трения, которая может быть учтена, при необходимости, согласно

исследованию [13] и с учетом системы (1) уравнение движения привода можно записать как

$$L_{\text{мех}} \frac{d^2\chi}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}}\chi = k_{\text{д}} (M_{\alpha} i_{\alpha s} i_{\beta r} + M_{\beta} i_{\beta s} i_{\alpha r}), \quad (3)$$

где  $\chi = \int \omega dt$  – обобщенная координата положения подвижного элемента.

Решение уравнения (3) можно найти, если разложить его правую часть в ряд Маклорена по степеням угловой скорости  $\omega$  в окрестности точки  $\omega = 0$ .

Ограничиваясь первыми двумя членами ряда Маклорена из-за его сильной сходимости [11], уравнение (3) преобразуем к виду

$$L_{\text{мех}} \frac{d^2\chi}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}}\chi = M_{\text{эм}}(0) + F_{\text{демп}}\omega, \quad (4)$$

где  $M_{\text{эм}}(0) = M_{\text{п}}$ ,  $F_{\text{демп}}\omega = M_{\text{демп}}$  – пусковая и демпфирующая составляющие электромагнитного момента соответственно.

Определив из системы уравнений (2) значения фазных токов и их производных и подставив найденные значения в уравнение (4), искомый закон движения подвижного элемента АД можно найти методом гармонического баланса [14].

Так, при фазовой потенциальной модуляции обмотки первичного элемента двигателя подключаются

$$M_{\text{п}} = k_{\text{д}} (M_{\alpha} i_{\alpha s} i_{\beta r} - M_{\beta} i_{\beta s} i_{\alpha r}) =$$

$$= k_{\text{д}} \left[ \begin{array}{l} M_{\alpha} \left( \begin{array}{l} O_1 (\cos(\Omega t - \gamma + \lambda_1) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \lambda_2)) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \begin{array}{l} O_{2k} (\cos(((2k-1)\Omega - \omega_1 - \omega_2)t - \gamma + \lambda_{3k}) - \cos((2k-2)\Omega t + \gamma + \lambda_{4k})) + \\ + O_{3k} (\cos(2k\Omega t - \gamma + \lambda_{5k}) - \cos(((2k-1)\Omega + \omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \lambda_{6k})) \end{array} \right) \end{array} \right) - \\ - M_{\beta} \left( \begin{array}{l} O_4 (\cos(\Omega t - \gamma + \lambda_7) - \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \lambda_8)) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \begin{array}{l} O_{5k} (\cos((- (2k-1)\Omega + \omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \lambda_{9k}) - \cos((2k-2)\Omega t + \gamma + \lambda_{10k})) + \\ + O_{6k} (\cos(2k\Omega t - \gamma + \lambda_{11k}) - \cos(((2k-1)\Omega + \omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \lambda_{12k})) \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right), \quad (6)$$

где  $O_1, O_{2k}, O_{3k}, O_4, O_{5k}, O_{6k}$  и  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{3k}, \lambda_{4k}, \lambda_{5k}, \lambda_{6k}, \lambda_7, \lambda_8, \lambda_{9k}, \lambda_{10k}, \lambda_{11k}, \lambda_{12k}$  – амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих пускового момента, зависящие от параметров электрической машины и питающих напряжений.

Так как для высокочастотных составляющих пускового момента электрическая машина является естественным фильтром нижних частот, то в дальнейшем для нахождения закона движения  $\chi(t)$  в выражении (6) достаточно учесть только низкочастотные составляющие, кратные частоте  $\Omega$ . Тогда после тригонометрических преобразований получим

$$M_{\text{п}} = N_1 \cos(\Omega t + \gamma + \varphi_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \left( \begin{array}{l} N_{2k} \cos((2k-2)\Omega t + \gamma + \varphi_{2k}) + \\ + N_{3k} \cos(2k\Omega t + \gamma + \varphi_{3k}) \end{array} \right),$$

к источникам напряжений, аналитические выражения для которых в общем случае имеют вид

$$U_{\alpha s}(t) = U_{m1} \cos(\omega_1 t) \left( \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)\omega t)}{2k-1} \right),$$

$$U_{\beta s}(t) = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \gamma),$$

где  $U_{m1}, U_{m2}, \omega_1, \omega_2, \gamma$  – амплитуды, угловые частоты и фазовый сдвиг питающих напряжений.

Тогда в соответствии с изложенной методикой решение первых четырех уравнений системы дифференциальных уравнений (1) во временной форме можно записать как

$$i_n(t) = U_{m1} \left( T_{1n} \sin(\omega_1 t + \delta_{1n}) + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left( \begin{array}{l} T_{2nk} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{2nk}) + \\ + T_{3nk} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{3nk}) \end{array} \right) \right) + U_{m2} T_{4n} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{4n}), \quad (5)$$

где  $T_{1n}, T_{2nk}, T_{3nk}, T_{4n}$  и  $\delta_{1n}, \delta_{2nk}, \delta_{3nk}, \delta_{4n}$  – амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих токов, определяемые параметрами электрической машины и функциями регулирования.

С учетом формулы (5) и  $\Omega = \omega_1 - \omega_2$  при  $\omega = 0$  пусковой момент АД в режиме пульсирующего движения запишется как

где  $N_1, N_{2k}, N_{3k}$  – коэффициенты, зависящие от параметров электрической машины и питающих напряжений;  $\varphi_1, \varphi_{2k}, \varphi_{3k}$  – начальные фазы низкочастотных составляющих пускового момента.

Для определения демпфирующего момента необходимо найти первые производные токов по угловой скорости  $\omega$ :

$$M_{\text{демп}} = k_{\text{д}} \omega \left( M_{\alpha} (i'_{\alpha s} i_{\beta r} + i_{\alpha s} i'_{\beta r}) - M_{\beta} (i'_{\beta s} i_{\alpha r} + i_{\beta s} i'_{\alpha r}) \right).$$

Он так же, как и пусковой момент, содержит гармонические составляющие, кратные циклическим

частотам питающей сети  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  и частоте пульсаций  $\Omega$ . Однако с учетом того, что весовой вклад периодических составляющих в общее значение демпфирующего момента не превышает 3 % [15], с достаточной степенью точности он может быть представлен только своей постоянной составляющей:

$$M_{\text{демп}} = k_{\text{д}} \omega \left( \begin{array}{l} M_{\alpha} (P_1 \cos(\delta_1) + P_2 \cos(\delta_2)) - \\ - M_{\beta} (P_3 \cos(\delta_3) + P_4 \cos(\delta_4)) \end{array} \right),$$

где  $P_1, P_2, P_3, P_4$  и  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$  – коэффициенты и начальные фазы составляющих демпфирующего момента.

Тогда уравнение движения принимает вид

$$L_{\text{мех}} \frac{d^2 \chi}{dt^2} + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}} \chi = M_{\text{п}}, \quad (7)$$

и его решение запишется как

$$\chi(t) = \chi_1 \sin(\Omega t + \alpha_1) + \sum_{h=1}^{\infty} \chi_{2k} \sin((2k-2)\Omega t + \alpha_{2k}) + \chi_{3k} \sin(2k\Omega t + \alpha_{3k}),$$

где  $\chi_1, \chi_{2k}, \chi_{3k}, \alpha_1, \alpha_{2k}, \alpha_{3k}$  – амплитудные значения и начальные фазы гармонических составляющих закона движения подвижного элемента АД.

В свою очередь, амплитудные значения

$$\chi_1 = \sqrt{\chi_{11}^2 + \chi_{12}^2}, \quad \chi_{2k} = \sqrt{\chi_{21k}^2 + \chi_{22k}^2}, \\ \chi_{3k} = \sqrt{\chi_{31k}^2 + \chi_{32k}^2},$$

где

$$\chi_{11} = \frac{N_{11} (C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} \Omega^2) - N_{12} (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) \Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2 \Omega^2}, \\ \chi_{12} = \frac{N_{12} (C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} \Omega^2) + N_{11} (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) \Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2 \Omega^2}, \\ \chi_{21k} = \frac{N_{21k} (C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} (2k-2)^2 \Omega^2) - (C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} (2k-2)^2 \Omega^2)^2 + -N_{22k} (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) (2k-2) \Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} (2k-2)^2 \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2 (2k-2)^2 \Omega^2},$$

#### Параметры исполнительного двигателя

Мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	КПД	cos φ	Кратность пускового тока	Кратность максимального момента	Кратность пускового момента
0,75	2810	220	2	71	0,8	4,4	2,4	2,3

Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	Число пар полюсов	Сопротивление взаимоиנדуктивности, Ом	Активное сопротивление обмотки статора, Ом	Активное сопротивление обмотки ротора, Ом	Сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом	Сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом
2,1·10 <sup>-3</sup>	1	149,035	9,195	8,564	10,218	13,143

$$\chi_{22k} = \frac{N_{22k} (C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} (2k-2)^2 \Omega^2) + (C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} (2k-2)^2 \Omega^2)^2 + + N_{21k} (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) (2k-2) \Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}} (2k-2)^2 \Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2 (2k-2)^2 \Omega^2},$$

$$\chi_{31k} = \frac{N_{31k} (C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}} k^2 \Omega^2) - (C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}} k^2 \Omega^2)^2 + -2N_{32k} (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) k \Omega}{(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}} k^2 \Omega^2)^2 + + 4(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2 k^2 \Omega^2},$$

$$\chi_{32k} = \frac{N_{32k} (C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}} k^2 \Omega^2) + (C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}} k^2 \Omega^2)^2 + + 2N_{31k} (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}}) k \Omega}{(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}} k^2 \Omega^2)^2 + + 4(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2 k^2 \Omega^2},$$

а начальные фазы соответственно

$$\alpha_1 = \text{arctg} \frac{\chi_{11}}{\chi_{12}}, \quad \alpha_{2k} = \text{arctg} \frac{\chi_{21k}}{\chi_{22k}}, \quad \alpha_{3k} = \text{arctg} \frac{\chi_{31k}}{\chi_{32k}},$$

где

$$N_{11} = N_1 \sin \varphi_1; \quad N_{21k} = N_{2k} \sin \varphi_{2k}; \quad N_{31k} = N_{3k} \sin \varphi_{3k}; \\ N_{12} = N_1 \cos \varphi_1; \quad N_{22k} = N_{2k} \cos \varphi_{2k}; \quad N_{32k} = N_{3k} \cos \varphi_{3k}.$$

**Результаты сравнительного анализа.** С целью проверки методики расчета и правильности полученных инженерных соотношений проведена их сравнительная оценка с результатами математического моделирования электропривода, выполненного на базе асинхронного двигателя АИР71А2 в программной среде MATLAB [16] (см. таблицу).

В качестве примера представлены токи обмотки статора АД (рис. 2), найденные согласно выражению (5) (кривая 1) и в результате математического моделирования (кривая 2), а также законы изменения электромагнитного момента  $M_{\text{эм}}(t)$  и координаты положения подвижного элемента привода  $\chi(t)$  (рис. 3). Как видно, максимальное расхождение результатов не превышает 3 и 6 % соответственно, что говорит о правомочности применения методики расчета для определения выходных параметров асинхронных электроприводов с пульсирующим режимом работы.

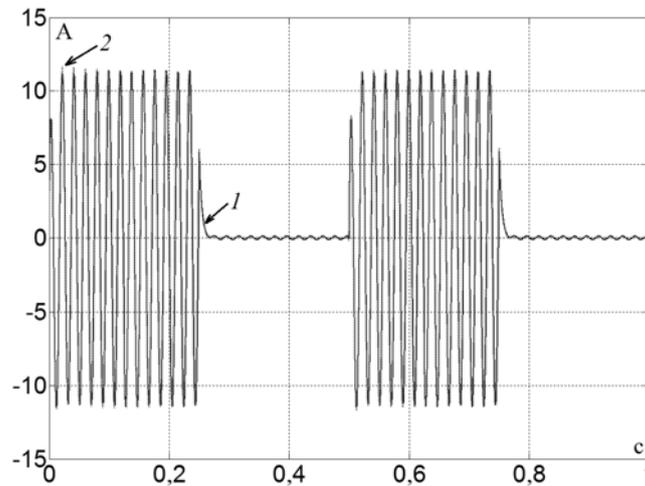


Рис. 2. Ток фазы  $i_{as}(t)$  асинхронного двигателя:  
1 – результаты аналитического расчета; 2 – результаты математического моделирования

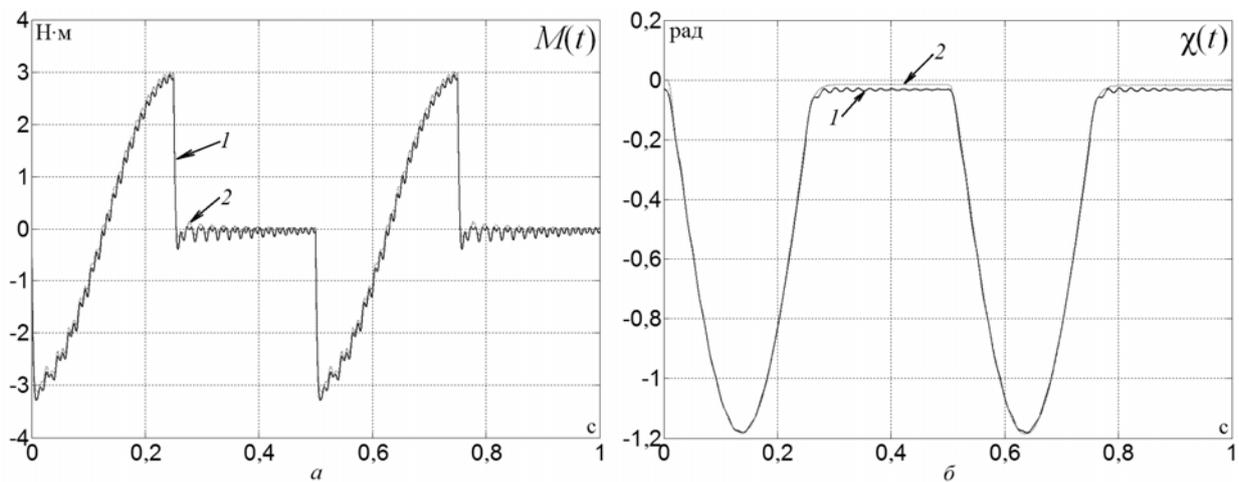


Рис. 3. Законы изменения: а – электромагнитного момента  $M_{эм}(t)$ ; б – координаты подвижного элемента привода  $\chi(t)$ ;  
1 – результаты аналитического расчета; 2 – результаты математического моделирования

**Заключение.** Полученные выражения являются теоретической основой для расчета и исследования электроприводов, работающих в режиме пульсирующего движения, и могут быть рекомендованы к применению при их разработке и анализе.

#### Библиографические ссылки

1. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering : handbook. Washington : Naval Air Warfare Center, 1999. 299 P.
2. Пат. 2089988 Российская Федерация, МПК Н 02 К 7/00. Электропривод / Горелик Э. А., Жуковский Ю. В., Литвинов Б. В., Тув А. М., Хомяков В. В. Заявл. 07.03.95 ; опубл. 10.09. 97.
3. Аристов А. В. Электропривод колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Изв. Том. политехн. ун-та. Энергетика. 2008. Т. 313, № 4. С. 107–109.
4. Луковников В. И. Электропривод колебательно-го движения. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

5. Ивоботенко Б. А., Казаченко В. Ф. Проектирование шагового электропривода. М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1985. 100 с.
6. Грачев С. А., Луковников В. И. Безредукторный электромашиный привод периодического движения. Минск : Высш. шк., 1991. 160 с.
7. Грачев С. А. Исследование динамики специальных режимов работы асинхронных электродвигателей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1975. 18 с.
8. Со Лин Аунг. Исследование и разработка автоматических устройств управления замкнутыми шаговыми электроприводами с внутришаговой дискретной коррекцией скорости : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 28 с.
9. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии. М. : Энергия, 1973. 400 с.
10. Громов А. К., Ершов А. Г., Лихачева А. В. Электромеханическое преобразование энергии: Данные и программа : учеб. пособие. Иваново, 2008. 1 электрон. опт. диск (CD RW).

11. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. М. : Энергия, 1974. 168 с.
12. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов: в 2 т. 5-е изд. СПб. : Питер, 2009. 512 с.
13. Луковников В. И., Веппер Л. В. Исследование автоколебательного движения однофазного асинхронного электродвигателя с линейной пружиной на валу // Вестник Гом. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. 2001. № 2(5). С. 33–42.
14. Аристов А. В. Разработка и исследование прецизионного электропривода угловых синусоидальных колебаний : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1982. 18 с.
15. Аристов А. В. Влияние преобразователя частоты на координатную точность электропривода // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники 2008. № 2 (18), ч. 2. С. 161–165.
16. MathWorks – MATLAB and Simulink for Technical Computing. URL: <http://www.mathworks.com/> (дата обращения: 31.10.2014).

### References

1. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering: handbook. Washington, Naval Air Warfare Center, 1999, 299 p.
2. Gorelik E. A., Zhukovsky U. V., Litvinov B. V., Tuv A. M., Khomyakov V. V. *Elektroprivod* [Electric Drive]. Patent RF, no. 2089988, 1997.
3. Aristov A. V. [Electric drive of an oscillating motion in the mode of discontinuous Relocation]. *Izv. Tom. politekhn. un-ta. Energetika*. 2008, vol. 313, no. 4, p. 107–109 (In Russ.).
4. Lukovnikov V. I. *Elektroprivod kolebatelnogo dvizheniya*. [Electric drive of an oscillating motion]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 152 p.
5. Ivobotenko B. A., Kazachenko V. F. *Proektirovanie shagovogo elektroprivoda* [Design of the step electric drive]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute (MPEI) Publ., 1985, 100 p.
6. Grachev S. A., Lukovnikov V. I. *Bezreduktorny elektromashinnyy privod periodicheskogo dvizheniya*. [Gearless dynamoelectric drive of periodic movement]. Minsk, Vysshaya Shkola Publ., 1991, 160 p.
7. Grachyov S. A. *Issledovanie dinamiki spetsial'nykh rezhimov raboty asinkhronnykh elektrodvigatelye*. *Avtoref. Dis. kand. tekhn. nauk*. [Research of dynamics of special operation modes of asynchronous electromotors. Abstract of a thesis in Engineering Science]. Tomsk, 1975, 18 p.
8. So Lin Aung. *Issledovanie i razrabotka avtomaticheskikh ustroystv upravleniya zamknutymi shagovymi elektroprivodami s vnutrishagovoy diskretnoy korrektsiei skorosti*. *Avtoref. Dis. kand. tekhn. nauk*. [Research and Development of Automatic Devices of Control of Closed Step Electric Drives with Intra Step Discrete Correction of Speed. Abstract of a thesis in Engineering Science]. Moscow, 2008, 28 p.
9. Kopylov I. P. *Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii*. [Electromechanical transformers of energy]. Moscow, Energiya Publ., 1973, 400 p.
10. Gromov A. K., Yershov A. G., Likhacheva A. V. *Elektromekhanicheskoe preobrazovanie energii* [Electromechanical conversion of energy]. Ivanovo, 2008.
11. Brodovskiy V. N., Ivanov E. S. *Privody s chastotno-tokovym upravleniem*. [Drives with the frequency and current control]. Moscow, Energiya Publ., 1974, 168 p.
12. Demirchyan K. S., Neumann L. R., Korovkin N. V. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki*. [Theoretical bases of electrical engineering]. St.Petersburg, Piter Publ., 2009, 512 p.
13. Lukovnikov V. I., Vepper L. V. [Research of self-oscillatory movement of the single-phase asynchronous electromotor with the linear spring on a shaft]. *Vestnik Gom. gos. tekhn. un-ta im. P.O. Sukhogo*. 2001, no. 2(5), p. 33–42 (In Russ.).
14. Aristov A. V. *Razrabotka i issledovanie pretsizionnogo elektroprivoda uglovykh sinusoidal'nykh kolebaniy*. *Avtoref. Dis. kand. tekhn. nauk* [Development and research of the precision electric drive of angular sine wave oscillations. Abstract of a thesis in Engineering Science]. Tomsk, 1982, 18 p.
15. Aristov A. V. [Influence of the frequency converter on the coordinate accuracy of electric drive]. *Dokl. Tom. gos. un-ta sistem upravleniya i radioelektroniki*. 2008, no. 2 (18), part 2, p. 161–165.
16. MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing. Available at: <http://www.mathworks.com/> (date of the access: 31.10.2014).