

На правах рукописи



Воронина Наталья Алексеевна

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С ПЕРЕРЫВИСТЫМ
ЗАКОНОМ ДВИЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» на кафедре электропривода и электрооборудования Энергетического института.

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Аристов Анатолий Владимирович

Официальные оппоненты:

Власьевский Станислав Васильевич
доктор технических наук, профессор
каф. «Электротехника, электроника
и электромеханика», г. Хабаровск,
Дальневосточный государственный
университет путей сообщения

Богданов Александр Александрович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
ОАО НПЦ «Полус», г. Томск

Ведущая организация:

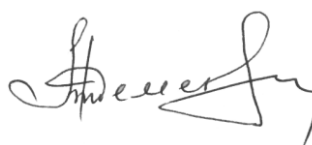
ФГБОУ ВПО Иркутский государственный
технический университет, г. Иркутск

Защита диссертации состоится 17 декабря 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГБОУ ВПО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Национального исследовательского Томского политехнического университета».

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного
совета Д 212.269.11
к.т.н., доцент



Ю.Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электропривод углового движения с прерывистым движением вала широко используются в машино- и приборостроении, горной и химической промышленности, в технике контроля и измерения, строительстве, текстильной промышленности и сейсмологии.

Существующие в настоящее время привода выполняются, как правило, на базе шаговых двигателей (ШД) или асинхронных двигателей (АД) с механическими преобразователями движения, что порой не позволяет осуществлять регулирование параметров движения непосредственно в технологическом процессе.

Кроме того, недостатками известных электроприводов являются: вероятность потери крутящего момента на высоких скоростях; возникновение резонансных явлений, при введении контуров обратной связи или возможность потери контроля над положением ротора ввиду отсутствия их; наличие дополнительных механических устройств преобразования движения и, как следствие, отсутствие плавного регулирования угла поворота шага; невозможность осуществления режима реверса.

Вопросами разработки электроприводов с прерывистым законом движения, и в частности на базе АД, занимались как российские, так и зарубежные ученые. Значительный вклад в эту область исследования внесли: Луковников В. И., Чиликин М. Г., Ивоботенко Б. А., Грачев С. А., Ткалич С. А., Мамедов Ф. А., Беспалов В. Я., Постников В. А., Балковой А. П., Со Лин Аунг, Lawrenson P. J., Harris M. R. и др.

Наиболее перспективным видится построение данного класса электроприводов на базе АД, работающих непосредственно в режиме прерывистого движения, за счет фазовой модуляции питающих напряжений (токов) с прерыванием питания по одной из обмоток в момент времени, когда электромагнитный момент, развиваемый двигателем, стремится к нулю. Однако, отсутствие теоретических исследований и обобщения комплекса вопросов расчетно-теоретического характера по данным электроприводам существенно сдерживает развитие и внедрение последних.

Объектом исследования является асинхронный электропривод углового движения с прерывистым движением вала.

Предметом исследования являются выходные характеристики электропривода углового движения с прерывистым движением вала.

Цель работы состоит в исследовании асинхронного электропривода углового движения с прерывистым движением вала при потенциальной и токовой фазовой модуляции.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- оценить современное состояние и тенденции развития электроприводов углового движения с прерывистым движением вала;
- вывести аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между параметрами электрической машины, источниками питания и нагрузкой при фазовой модуляции питающих напряжений (токов) и на основании их разрабо-

тать методику расчета выходных параметров электропривода с прерывистым законом движения;

- получить инженерные соотношения для расчета рабочих характеристик электропривода и определить условия их автономности при регулировании параметров;

- разработать имитационные модели электроприводов с прерывистым законом движения при потенциальной и токовой фазовой модуляциях для исследования динамических и кинематических характеристик;

- выработать критерии для расчета и оценки точностных характеристик электроприводов с прерывистым законом движения;

- экспериментально исследовать макетный образец электропривода в лабораторных условиях с целью проверки разработанных математических моделей, методик расчета и результатов теоретического анализа.

Методы исследования. При выполнении работы использовались аналитические, математические и экспериментальные методы исследования. В процессе аналитических и математических исследований использовались методы интегрального, дифференциального и операционного исчисления, а также численные методы расчета. Математическое моделирование было выполнено в средах MathCAD-14 и Matlab-2007. Экспериментальные исследования проводились на специально разработанном стенде с использованием методов контроля, измерения и обработки результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается сопоставлением результатов математического расчета и имитационного моделирования, а также проведенными экспериментальными исследованиями.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- показана перспективность использования АД с линейно-фазовой модуляцией фазных напряжений (токов) для создания регулируемых электроприводов углового и линейного движения с прерывистым движением вала;

- установлены неизвестные ранее аналитические связи между параметрами электрической машины, источниками питания и нагрузкой на основании которых разработана методика определения выходных параметров электропривода с прерывистым законом движения при фазовой потенциальной и токовой модуляции;

- получены аналитические соотношения, определяющие рабочие характеристики электропривода с прерывистым законом движения и условия обеспечения их автономности;

- определены критерии оценки точностных характеристик электропривода, работающего в режиме прерывистого движения за счет фазовой модуляции питающих напряжений (токов).

Практическая ценность работы:

- разработаны инженерно-практические рекомендации по оценке точностных характеристик асинхронного электропривода с прерывистым законом движения по максимальному коэффициенту неустойчивости внутри одного шага;

- создано программное обеспечение для анализа выходных характеристик асинхронного электропривода с прерывистым законом движения;

– найдены новые технические решения, позволяющие расширить эксплуатационные возможности двухфазных асинхронных двигателей, работающих в режиме прерывистого движения, путем стабилизации амплитуды координаты подвижного элемента двигателя при регулировании частоты шага и повышения его координатной точности за счет устранения высокочастотных пульсаций напряжения частоты сети и регулирования времени разгона подвижного элемента двухфазного асинхронного двигателя до установившегося значения амплитуды шага, защищенные патентами на полезные модели.

Реализация результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований переданы для внедрения на предприятие ООО «Сибметахим» г. Томска, подразделения ОАО «Газпром», а также используются в учебном процессе при выполнении курсовых и дипломных работ студентами кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и получили одобрение: на научно-технических семинарах кафедры «Электропривода и электрооборудования» ЭНИН ТПУ (г. Томск, 2009 – 2013г.); на IV Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2009 г.); на V Юбилейной Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», посвящённой памяти Г.А. Сипайлова (г. Томск, 2011 г.); на X, XV, XVI, XVII, XVIII Международных научно-практических конференциях студентов аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2003, 2009 – 2012г.), на всероссийской научной конференции молодых ученых (г. Новосибирск, НГТУ 2012 г.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 14 работах. Из них 3 статьи в изданиях из перечня, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в межвузовском научном сборнике, 2 патента РФ на полезную модель, 8 статей в сборниках докладов Международных и Всероссийских конференций.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 136 страниц машинописного текста, включая 53 рисунка, 6 таблиц, списка использованной литературы из 50 наименований и 6 приложений на 14 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность, цель и научная новизна решаемой задачи, а также структура работы и апробация результатов основных теоретических и экспериментальных исследований. Изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния вопроса разработки, принципов построения и применения электроприводов с прерывистым законом движения, в том числе на базе асинхронных двигателей (АД). Отмечается, что возможность обеспечения режима плавного пуска и остановки АД в моменты времени, когда электромагнитное усилие переходит через нуль, поз-

воляет использовать электроприводы колебательного движения в силовых механизмах с регулируемым прерывистым перемещением.

Во второй главе разработаны основы теории асинхронных электроприводов углового движения с прерывистым движением вала при потенциальной и токовой фазовой модуляции.

При потенциальной фазовой модуляции фазных напряжений функции регулирования имели вид

$$U_{\alpha s}(t) = U_m \gamma_1 \sin(\omega_1 t + \alpha) A(t); \quad U_{\beta s}(t) = U_m \gamma_2 \sin(\omega_2 t + \beta); \quad U_{\alpha r}(t) = 0; \quad U_{\beta r}(t) = 0,$$

где U_m – амплитудное значение питающего напряжения, численно равное номинальному напряжению питания исполнительного двигателя; $\gamma_i = U_{mi}/U_m$ – коэффициенты сигналов; $i = 1, 2$; ω_1, ω_2 – угловые частоты питающих напряжений; α, β – начальные фазы напряжений на обмотках; $A(t)$ – импульсная функция, определяемая как:

$$A(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \left(\sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(2i-1)\Omega t}{(2i-1)} \right). \quad \text{Здесь } \Omega = \omega_1 - \omega_2 \text{ – характеризует круговую частоту шага.}$$

Принимая, что частота шага Ω , как минимум, на порядок меньше частоты питающей сети определены значения фазных токов во временной форме

$$i_n(t) = (-1)^{n+1} U_m \gamma_1 \{ T_{1n} \sin(\omega_1 t + \alpha + \theta_{1n}) + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)} [T_{2ni} \sin([\omega_1 - (2i-1)\Omega]t - \alpha + \theta_{2ni}) - T_{3ni} \sin([\omega_1 + (2i-1)\Omega]t - \alpha + \theta_{3ni})] \} + (-1)^n U_m \gamma_2 T_{4n} \sin(\omega_2 t + \beta + \theta_{4n}),$$

где T_{in}, θ_{in} – коэффициенты и фазовые углы, определяемые параметрами электрической машины, что позволило определить пусковую

$$M_n(t) = S_1 \sin(\Omega t + \psi_1) + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)} \{ S_{2i} \sin(2i\Omega t + \psi_2) + S_{3i} \sin[(2i-1)\Omega t + \psi_3] + S_{4i} \sin[(2-2i)\Omega t + \psi_4] \}$$

и демпфирующие составляющие

$$\begin{aligned} F_0 &= U_m \gamma_2 \frac{1}{2} [I_{1.1(0)} T_{4.4} \cos(\varphi_{1(0)} - \theta_{4.4}) + I_{3(0)} T_{4.2} \cos(\varphi_{3(0)} - \theta_{4.2})] - \\ &- U_m \gamma_1 \frac{1}{2} [I_{4.1(0)} T_{1.1} \cos(\varphi_{4.1(0)} - \theta_{1.1}) + I_{2.1(0)} T_{1.3} \cos(\varphi_{2.1(0)} - \theta_{1.3})], \\ F_{0i,k} &= U_m \gamma_1 \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)} \{ [I_{4.11(0)} (T_{2.1i} - T_{3.1i}) + T_{1.11} (I_{4.2(0)i} - I_{4.3(0)i}) - \\ &- I_{2.11(0)} (T_{2.3i} - T_{3.3i}) - T_{1.31} (I_{2.2(0)i} - I_{2.3(0)i})] \} - \\ &- U_m \gamma_1 \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)} \{ [I_{4.2(0)k} T_{2.1i} + I_{4.3(0)k} T_{3.1i}] - [I_{2.2(0)k} T_{2.3i} + I_{2.3(0)k} T_{3.3i}] \} \end{aligned}$$

электромагнитного момента при предварительном разложении выражения, описывающего электромагнитный момент, $M_{\text{эм}}(t) = L_m (i_{\alpha s}(t) i_{\beta r}(t) - i_{\alpha r}(t) i_{\beta s}(t)) = M_{\text{н}}(t)$ в ряд Маклорена по скорости в окрестностях точки $\omega = 0$. Здесь $i_{\alpha s}(t) - i_{\beta r}(t)$ – мгновенные значения фазных токов; $M_{\text{н}}(t)$ – обобщенный момент нагрузки,

учитывающий инерционную $L_{\text{мех}}$, демпфирующую $R_{\text{мех}}$ и позиционную $C_{\text{мех}}^{-1}$ составляющие.

Составляющие коэффициента электромагнитного демпфирования представлены при пренебрежении гармоническими составляющими частот питающих напряжений, что допустимо, так как глубина модуляции периодических коэффициентов демпфирующей составляющей момента при низких частотах шага незначительна. Кроме того, выражение для пускового момента представлено с учетом пренебрежения высокочастотными составляющими частот ω_1, ω_2 и их комбинациями, для которых электрические машины являются естественным электромеханическим фильтром.

С учетом принятых допущений уравнение движения было преобразовано к виду $L_{\text{мех}} \frac{d^2\chi}{dt^2} + \left(R_{\text{мех}} - \left[F_0 + \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} F_{0i,k} \right] \right) \frac{d\chi}{dt} + C_{\text{мех}}^{-1} \chi = M_{\Pi}(t)$,

где χ – обобщённая координата положения подвижного элемента двигателя, а решение найдено как

$$\chi(t) = \chi_{1i,k} \sin(\Omega t + \varphi_{1i,k}) + \left\{ \chi_{2i,k} \sin[2i\Omega t + \varphi_{2i,k}] + \chi_{3i,k} \sin[(2i-1)\Omega t + \varphi_{3i,k}] + \right. \\ \left. + \chi_{4i,k} \sin[(2-2i)\Omega t + \varphi_{4i,k}] \right\}$$

Здесь $\chi_{j,i,k}$ – амплитуды и $\varphi_{j,i,k}$ – начальные фазы гармонических составляющих обобщённой координаты положения подвижного элемента двигателя, определяемые табл. 1.

Таблица 1

$\chi_{1i,k}$	$\sqrt{\frac{M_1^2 + M_2^2}{\Omega(L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})^2)}}$	$\varphi_{1i,k}$	$\text{Arctg} \left(\frac{M_2 L_{\text{мех}} \Omega - M_1 (R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})}{M_2 (R_{\text{мех}} - F_{0i,k}) + M_1 L_{\text{мех}} \Omega} \right)$
$\chi_{2i,k}$	$\sqrt{\frac{M_{3i}^2 + M_{4i}^2}{\frac{\Omega}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i}{(2i-1)} \left((R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})^2 + L_{\text{мех}}^2 4i^2 \Omega^2 \right)}}$	$\varphi_{2i,k}$	$\text{Arctg} \left(\frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2i}{(2i-1)} \frac{M_{4i} L_{\text{мех}} 2i\Omega - M_{3i} (R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})}{M_{4i} (R_{\text{мех}} - F_{0i,k}) + M_{3i} L_{\text{мех}} 2i\Omega} \right)$
$\chi_{3i,k}$	$\sqrt{\frac{M_{5i}^2 + M_{6i}^2}{\frac{\Omega}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \left((R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})^2 + L_{\text{мех}}^2 (2i-1)^2 \Omega^2 \right)}}$	$\chi_{3i,k}$	$\text{Arctg} \left(\frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \left\{ \frac{M_{6i} L_{\text{мех}} (2i-1)\Omega - M_{5i} (R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})}{M_{6i} (R_{\text{мех}} - F_{0i,k}) + M_{5i} L_{\text{мех}} (2i-1)\Omega} \right\} \right)$
$\chi_{4i,k}$	$\sqrt{\frac{M_{7i}^2 + M_{8i}^2}{\frac{\Omega}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(2i-2)}{(2i-1)} \left((R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})^2 + L_{\text{мех}}^2 (2i-2)^2 \Omega^2 \right)}}$	$\varphi_{4i,k}$	$\text{Arctg} \left(\frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(2-2i)}{(2i-1)} \left\{ \frac{M_{8i} L_{\text{мех}} (2-2i)\Omega - M_{7i} (R_{\text{мех}} - F_{\Sigma i,k})}{M_{8i} (R_{\text{мех}} - F_{0i,k}) + M_{7i} L_{\text{мех}} (2-2i)\Omega} \right\} \right)$

При токовой фазовой модуляции известными являются статорные фазные токи, а неизвестными – фазные напряжения и роторные токи. В этом случае фазные обмотки АД подключаются к источникам токов, аналитические выражения для которых имеют вид

$$i_{\alpha s}(t) = I_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha) A(t); \quad i_{\beta s}(t) = I_{m2} \sin(\omega_2 t + \beta),$$

где $I_{m1}, I_{m2}, \alpha, \beta, \omega_1, \omega_2$ – амплитуды, фазовые сдвиги и угловые частоты фазных токов.

С учетом характеристических корней функций регулирования, значения роторных токов во временной форме были определены как

$$i_n(t) = (-1)^{n+1} M_{\alpha} I_{m1} \left\{ -T_{1n} (\omega_1 \sin(\omega_1 t - \alpha - \theta_{1n}) + \omega \sin(\omega_1 t + \alpha + \theta_{1n})) + \right. \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\left(\frac{\omega_1}{(2i-1)} - \Omega \right) T_{2n_i} \sin \left([\omega_1 - (2i-1)\Omega] t + \alpha + \theta_{2n_i} \right) \right] + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \left[\left(\frac{\omega_1}{(2i-1)} - \Omega \right) T_{3n_i} \sin \left([\omega_1 + (2i-1)\Omega] t + \alpha + \theta_{3n_i} \right) \right] + \\ + \omega \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)} \left[T_{2n_i} \sin \left([\omega_1 - (2i-1)\Omega] t - \alpha - \theta_{2n_i} \right) + \frac{1}{2} T_{3n_i} \sin \left([\omega_1 + (2i-1)\Omega] t + \alpha + \theta_{3n_i} \right) \right] \Big\} + \\ + (-1)^{n+1} M_{\beta} I_{m2} T_{4n} (\omega \sin(\omega_2 t + \beta + \theta_{4n}) + \omega_2 \sin(\omega_2 t - \beta - \theta_{4n})),$$

а значение обобщенного электромагнитного усилия в виде

$$F_{\text{эл}}^*(t) = F_1^* \sin(\Omega t + \psi_1^*) + \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \left[F_{2i}^* \sin(2i\Omega t + \psi_2^*) + F_{3i}^* \sin[(2i-1)\Omega t + \psi_3^*] + \right. \\ \left. + F_{4i}^* \sin[(2-2i)\Omega t + \psi_4^*] \right] + F_{i,k}^* \frac{d\chi}{dt}.$$

Здесь $F_{j,i}$ – амплитудные значения и $\psi_{j,i}$ начальные фазы обобщенного электромагнитного усилия, определяемые параметрами электрической машины, источников питания и нагрузки.

На основании полученных соотношений были разработаны методики расчета выходных параметров электропривода прерывистого движения при потенциальной и токовой фазовой модуляции, алгоритмы которых представлены на рис. 1.

Полученные соотношения составили теоретическую основу для определения рабочих характеристик электродвигателя, работающего в шаговом режиме за счет фазовой модуляции питающих напряжений (табл.2).

В ней первая гармоника шаговой составляющей электромагнитного момента $M_{\text{эл1}}(t) = M_m \sin(\Omega t + \theta)$, где

$$M_m = M \left[\frac{R_{\text{мех}}^2 + L_{\text{мех}}^2 \Omega^2}{(R_{\text{мех}} - F_0)^2 (1 + Z(\Omega)^2)} \right]^{0,5}; \quad \theta = \varphi + \arctg \frac{1}{Z(\Omega)}, \quad Z(\Omega) = \frac{L_{\text{мех}} \Omega}{(R_{\text{мех}} - F_0)} -$$

электромеханическая постоянная времени; G_k – коэффициенты, определяемые параметрами электрической машины; $k=1..3$.

В качестве примера на рис. 2 представлены регулировочные характеристики $\chi_m(\gamma)$ и $M_m(\gamma)$ для асинхронного двигателя 4AK160S8Y3 при запуске на частоту $\Omega=0,057$ о.е.

Они представляют практический интерес, так как иллюстрируют возможность пропорционального регулирования величины шага и момента при изменении фазного напряжения, например, по одной из обмоток двигателя (кривая 1).

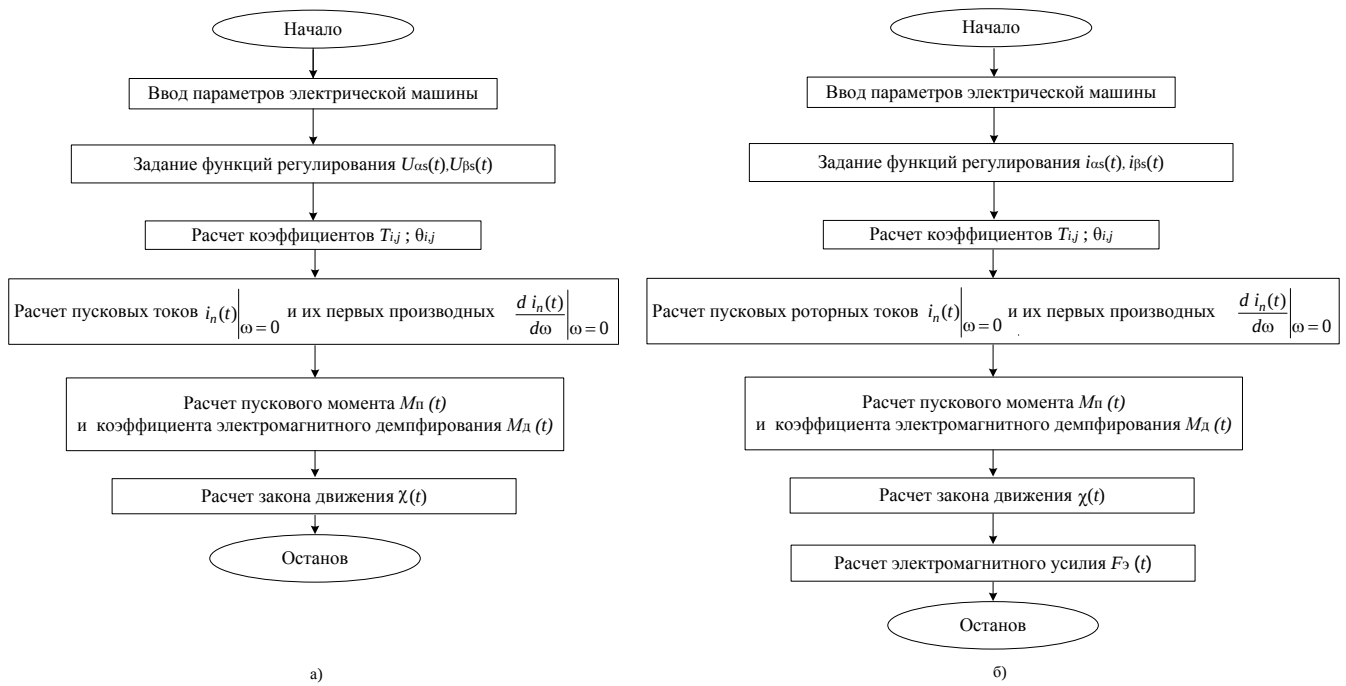


Рис. 1. Алгоритмы расчета выходных параметров электропривода с прерывистым движением при а) – потенциальной и б) токовой фазовой модуляции

1. Частотные характеристики

Таблица 2

Обобщенная координата положения $\chi(t)$	Амплитуда χ_m	$\frac{M}{\Omega(R_{\text{мех}} - F_0)[1 + Z(\Omega)^2]^{0,5}}$
Обобщенная скорость $\omega(t)$	Амплитуда ω_m	$\frac{M}{(R_{\text{мех}} - F_0)[1 + Z(\Omega)^2]^{0,5}}$
Обобщенный электромагнитный момент $M_{\text{эм}}(t)$	Амплитуда M_m	$M \left[\frac{R_{\text{мех}}^2 + L_{\text{мех}}^2 \Omega^2}{(R_{\text{мех}} - F_0)^2 (1 + Z(\Omega)^2)} \right]^{0,5}$

2. Механические характеристики по координате положения и скорости

Амплитудные	$\chi_m(M_m)$	$M_m \Omega^{-1} [L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + R_{\text{мех}}^2]^{-0,5}$
	$\omega_m(M_m)$	$M_m [L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + R_{\text{мех}}^2]^{-0,5}$
Мгновенные (эллипс)	$\chi(M_{\text{эм1}})$	$\frac{\chi^2}{\chi_m^2} [1 + Z(\Omega)^2] + \frac{M_{\text{эм1}}^2}{M_m^2} [1 + Z(\Omega)^2] - 2 \frac{M_{\text{эм1}} \chi}{M_m \chi_m} Z(\Omega) [1 + Z(\Omega)^2]^{0,5} = 1$
	$\omega(M_{\text{эм1}})$	$\frac{\omega^2}{\omega_m^2} \left[1 + \frac{1}{Z(\Omega)^2} \right] + \frac{M_{\text{эм1}}^2}{M_m^2} \left[1 + \frac{1}{Z(\Omega)^2} \right] - 2 \frac{M_{\text{эм1}} \omega}{M_m \omega_m} \frac{1}{Z(\Omega)^2} [1 + Z(\Omega)^2]^{0,5} = 1$

3. Регулировочные характеристики

γ	$\gamma_2=1, \gamma_1=\gamma - \text{var}$	$\gamma_1=\gamma_2=\gamma - \text{var}$
χ_m	$\frac{\gamma G_1}{\Omega [L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + [R_{\text{мех}}^2 - (\gamma^2 G_2 + G_3)]^2]^{0,5}}$	$\frac{\gamma^2 G_1}{\Omega [L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + [R_{\text{мех}}^2 - (\gamma^2 G_2 + G_3)]^2]^{0,5}}$

ω_m	$\frac{\gamma G_1}{\left[L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + \left[R_{\text{мех}}^2 - (\gamma^2 G_2 + G_3) \right]^2 \right]^{0,5}}$	$\frac{\gamma^2 G_1}{\left[L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + \left[R_{\text{мех}}^2 - (\gamma^2 G_2 + G_3) \right]^2 \right]^{0,5}}$
M_m	$\gamma G_1 \left[\frac{R_{\text{мех}}^2 + L_{\text{мех}}^2 \Omega^2}{L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + \left[R_{\text{мех}}^2 - (\gamma^2 G_2 + G_3) \right]^2} \right]^{0,5}$	$\gamma^2 G_1 \left[\frac{R_{\text{мех}}^2 + L_{\text{мех}}^2 \Omega^2}{L_{\text{мех}}^2 \Omega^2 + \left[R_{\text{мех}}^2 - (\gamma^2 G_2 + G_3) \right]^2} \right]^{0,5}$

4. Условие автономности регулирования параметров

Автономность амплитуды	Координаты $\chi_m = \text{const}$	$\Omega = \left[-\frac{(R_{\text{мех}} - F_0)^2}{2L_{\text{мех}}^2} + \left[\frac{(R_{\text{мех}} - F_0)^4}{4L_{\text{мех}}^2} + \frac{M^2}{L_{\text{мех}}^2 \chi_m^2} \right]^{0,5} \right]^{0,5}$
	Скорости $\omega_m = \text{const}$	$\Omega = \left[-\frac{\omega_m^2 (R_{\text{мех}} - F_0)^2 - M^2}{\omega_m^2 L_{\text{мех}}^2} \right]^{0,5}$
	Моменты $M_m = \text{const}$	$\Omega = \left[-\frac{M_m^2 (R_{\text{мех}} - F_0)^2 - M^2 R_{\text{мех}}^2}{2L_{\text{мех}}^2 (M_m^2 - M^2)} \right]^{0,5}$

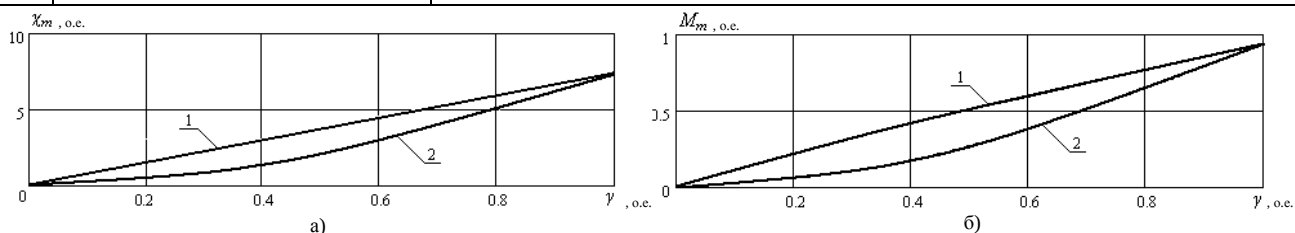


Рис. 2. Законы регулирования амплитуд закона движения а) и электромагнитного момента б) при $\gamma_1 - \text{var}$, $\gamma_2 = 1 - (1)$; $\gamma_1 = \gamma_2 - \text{var} - (2)$

На рис. 3 представлены характеристики $\Omega(\gamma)$ при обеспечении постоянства амплитуды шага χ_m для двух заданных уровней. Анализ характеристик позволяет констатировать факт о возможности обеспечения постоянства амплитуды шага за счет линейного регулирования одного из фазных напряжений двигателя (кривые 2,4).

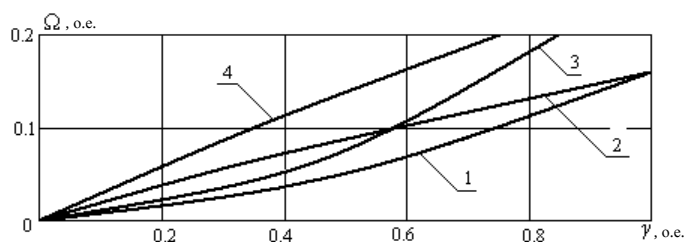


Рис. 3. Условие автономности регулирования амплитуды координаты при $\chi_m = 2,47$ о.е. (1,2), $\chi_m = 1,5$ о.е. (3,4) для $\gamma_1 = \gamma$, $\gamma_2 = 1$ (1,3), $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma$ (2,4)

Полученные аналитические зависимости рабочих характеристик электропривода при прерывистом движении указывают на возможность альтернативного выбора параметров электрической машины и функций регулирования при заданных параметрах нагрузки для построения специализированных комплексов с требуемыми кинематическими и силовыми характеристиками.

Одним из важнейших показателей качества, характеризующих работу электропривода, работающего в режиме прерывистого движения за счет модуляции фазных напряжений или токов, является точность его позиционирования. Последнюю предложено оценивать по максимальному значению относительной координатной погрешности как

$$\delta_m = [\chi_1(t_m) - \chi(t_m)] / \chi_0,$$

где $\chi_1(t_m)$, $\chi(t_m)$ – идеальный и реальный законы изменения во времени обобщенной (угловой или линейной) координаты положения подвижного элемента электродвигателя в момент времени t_m , при котором разность $\chi_1(t) - \chi(t)$ становится максимальной; χ_0 – базовый размер электродвигателя.

Установлено, что относительные погрешности по амплитуде и частоте шага в электроприводе с прерывистым движением сложным образом зависят от отклонения параметров источников питания $U_{\alpha sm} = U_m \gamma_1$, $U_{\beta sm} = U_m \gamma_2$, $I_{\alpha sm}$, $I_{\beta sm}$, Ω и значений параметров нагрузки $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$. Вклад каждой составляющей в относительную максимальную погрешность при отклонении, например, параметров источников питания можно найти через полные дифференциалы. Выражение, для определения погрешности по амплитуде $\delta\varphi_m$, а, следовательно, и по нейтралю шага $\delta\varphi_0$ при потенциальной и токовой фазовой модуляции, будут иметь вид

$$\delta\varphi_m = \chi_m^{-1} \left(U_{\alpha sm} \frac{\partial \chi_m}{\partial U_{\alpha sm}} \delta U_{\alpha sm} + U_{\beta sm} \frac{\partial \chi_m}{\partial U_{\beta sm}} \delta U_{\beta sm} + \Omega \frac{\partial \chi_m}{\partial \Omega} \delta \Omega \right) = K_1 \delta U_{\alpha sm} + K_2 \delta U_{\beta sm} + K_3 \delta \Omega,$$

$$\delta\varphi_m = \chi_m^{-1} \left(I_{\alpha sm} \frac{\partial \chi_m}{\partial I_{\alpha sm}} \delta I_{\alpha sm} + I_{\beta sm} \frac{\partial \chi_m}{\partial I_{\beta sm}} \delta I_{\beta sm} + \Omega \frac{\partial \chi_m}{\partial \Omega} \delta \Omega \right) = K_1^* \delta I_{\alpha sm} + K_2^* \delta I_{\beta sm} + K_3^* \delta \Omega,$$

где весовые коэффициенты $K_1 - K_3$; $K_1^* - K_3^*$ определяющие вклад в соответствующую относительную погрешность от отклонения каждого параметра питания при заданной нагрузке представлены в табл. 3.

Весовые коэффициенты относительной погрешности по амплитуде шага Таблица 3

Потенциальная модуляция		Токовая модуляция	
K_1	$U_{\alpha sm}^2 \left\{ \frac{A_1 [G - (M_1^2 + M_2^2) A_2]}{G \sqrt{M_1^2 + M_2^2}} + \frac{A_{12} [G - (M_5^2 + M_6^2) A_2]}{G \sqrt{M_5^2 + M_6^2}} \right\}$	K_1^*	$\frac{A_1^* I_{\alpha sm}^2 (G^* - (M_1^*)^2 + (M_2^*)^2 A_2^*)}{G^* \sqrt{(M_1^*)^2 + (M_2^*)^2}} +$ $+\frac{A_{12}^* I_{\alpha sm}^2 (G^* - (M_7^*)^2 + (M_8^*)^2 A_2^*)}{G^* \sqrt{(M_7^*)^2 + (M_8^*)^2}} +$ $+\frac{A_{121}^* I_{\alpha sm}^2 (G^* - (M_9^*)^2 + (M_{10}^*)^2 A_2^*)}{G^* \sqrt{(M_9^*)^2 + (M_{10}^*)^2}}$
K_2	$U_{\beta sm}^2 \left\{ \frac{A_{11} [G - (M_1^2 + M_2^2) A_3]}{G \sqrt{M_1^2 + M_2^2}} + \frac{A_{13} [G - (M_5^2 + M_6^2) A_3]}{G \sqrt{M_5^2 + M_6^2}} \right\}$	K_2^*	$\frac{A_{11}^* I_{\beta sm}^2}{\sqrt{(M_1^*)^2 + (M_2^*)^2}} + \frac{A_{13}^* I_{\beta sm}^2}{\sqrt{(M_7^*)^2 + (M_8^*)^2}} +$ $+\frac{A_{131}^* I_{\beta sm}^2}{\sqrt{(M_9^*)^2 + (M_{10}^*)^2}}$
K_3	$\frac{2 [\Omega (F_0 - R_{\text{мех}})^2 - 2 L_{\text{мех}}^2 \Omega^3]}{G}$	K_3^*	$\frac{3 [\Omega (F_0^* - R_{\text{мех}})^2 - 2 L_{\text{мех}}^2 \Omega^2]}{G^*}$

Приведенные на рис. 4 расчетные зависимости δ_m показывают, что наибольшее влияние на точность позиционирования асинхронного двигателя, почти на порядок превышающей остальные, оказывает отклонение частоты питающей сети Δf . Учёт отклонения частоты следует рекомендовать при построении систем управления данными электроприводами по принципу синхронизации с частотой сети.

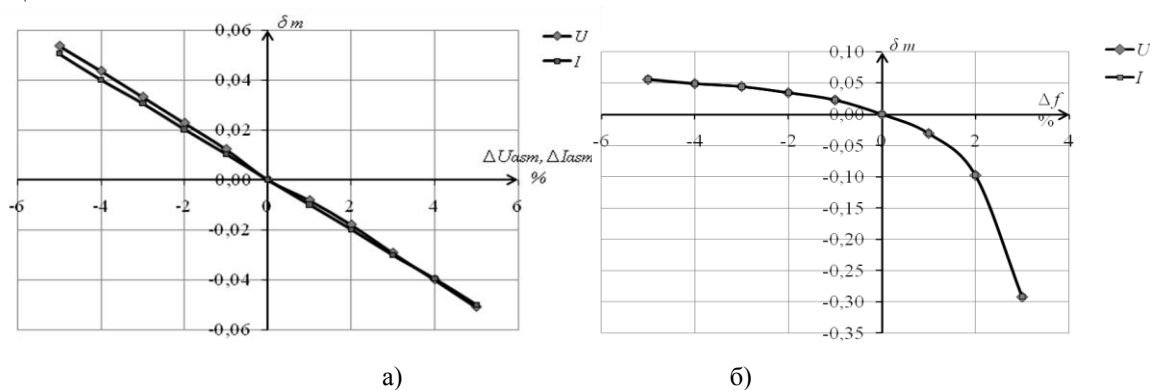


Рис. 4. Зависимость относительной координатной погрешности δ_m а) от отклонения амплитуды напряжения (тока) источника питания б) от отклонения частоты питающей сети Δf

В третьей главе представлено математическое моделирование электропривода с прерывистым законом движения в прикладном программном пакете MATLAB/Simulink. В качестве исследуемых параметров рассматривались электромагнитный момент $M(t)$, скорость $\omega(t)$ и координата подвижного элемента электропривода $\chi(t)$.

На рис. 5 представлены результаты имитационного моделирования электропривода, выполненного на базе АИР 71А2 при запуске на частоту $f_{ш} = 2$ Гц и $L_{мех} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $R_{мех} = 0,2 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$.

Анализ их показывает, что независимо от режима работы при фазовой модуляции питающих напряжений или токов, обеспечивается постоянство амплитуды шага в течение всего периода частоты $f_{ш}$. Отрицательные выбросы электромагнитного момента вызваны, в первую очередь, погрешностью вычислений из-за иррационального соотношения между частотой питающей сети ω_1 и частотой прерывания, определяющей частоту шага. Кроме того, при потенциальном питании амплитуды электромагнитного момента, скорости и координаты подвижного элемента электропривода ($M_m = 4,304 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega_m = 20,9 \text{ рад/сек}$, $\chi_m = 3,265 \text{ рад}$) в 16 раз больше, чем при токовом питании ($M_m = 0,2651 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega_m = 1,325 \text{ рад/сек}$, $\chi_m = 0,2119 \text{ рад}$).

Это объясняется тем, что при потенциальном питании фазные токи асинхронного электродвигателя превышают свои номинальные значения в 3,9 раза, в то время как при токовом питании их значения выбирается равным номинальному (рис. 6).

С целью оценки влияния параметров источников питания на выходные характеристики электропривода были сняты регулировочные характеристики, при

потенциальном и токовом питании. Результаты исследований подтвердили правильность численных расчетов, проведенных по формулам табл. 2.

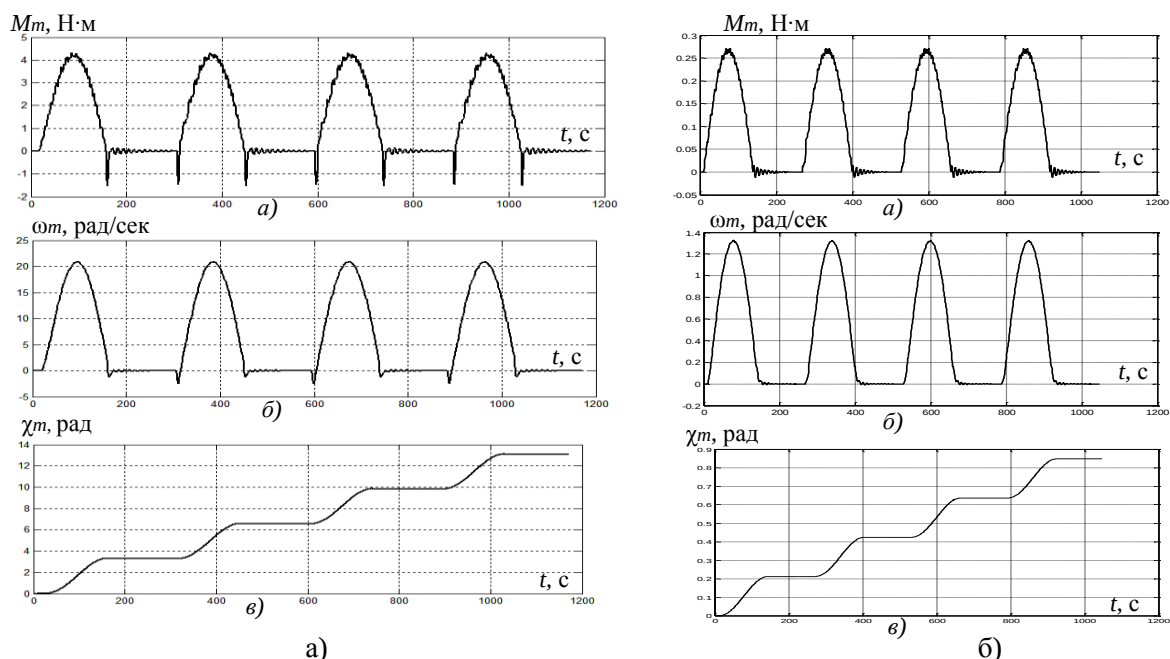


Рис. 5. Выходные характеристики электропривода с шаговым законом движения при: а) потенциальной и б) токовой фазовой модуляции

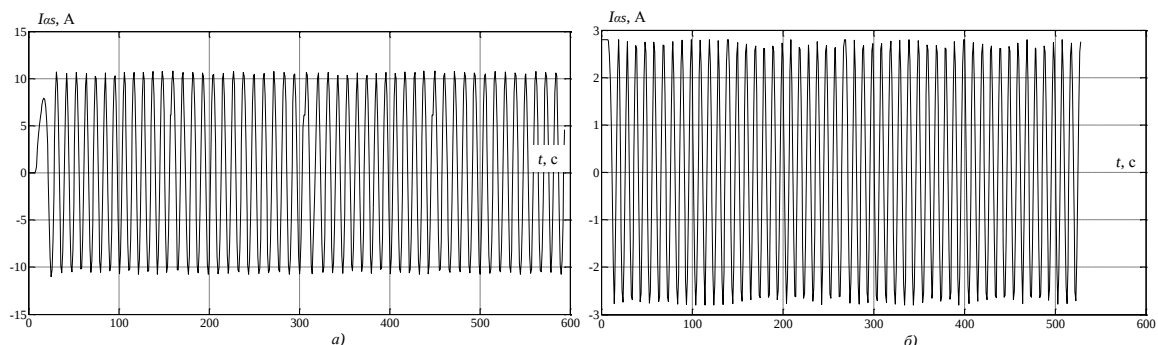


Рис. 6. Фазные токи асинхронного электродвигателя а) – при потенциальном питании, б) – при токовом питании

Установлено, что характеристики $\chi_m(\Omega)$, $M_m(\Omega)$, $\omega_m(\Omega)$ отличаются от характеристик электропривода, работающего в режиме колебательного движения за счет фазовой модуляции фазных напряжений. В частности характеристики $M_m(\Omega)$ и $\omega_m(\Omega)$ имеют в заданном диапазоне изменения частот практически линейный характер (рис. 7).

Исследования показали, что среди параметров нагрузки наибольшее влияние на выходные характеристики электропривода оказывает демпфирующая и позиционные составляющие. Так при значениях $R_{\text{мех}} \leq 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$ наблюдалась потеря динамической устойчивости, проявляющаяся в виде вращательно-колебательного режима работы, а внедрение даже небольшой по величине позиционной нагрузки ($C_{\text{мех}} = 0,315 \text{ Н} \cdot \text{м/рад}$) – приводило к колебательному режиму.

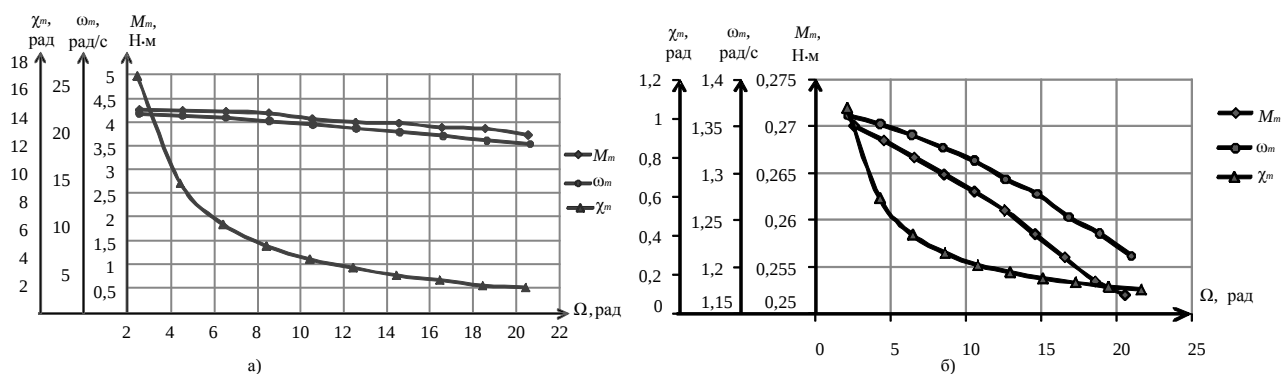


Рис. 7. Зависимости амплитуд электромагнитного момента M_m , скорости ω_m и координаты подвижного элемента электропривода χ_m от частоты шага Ω при: а) потенциальной и б) токовой фазовой модуляции

В четвертой главе приведены результаты экспериментального исследования и практического применения электроприводов с прерывистым законом движения. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 8.

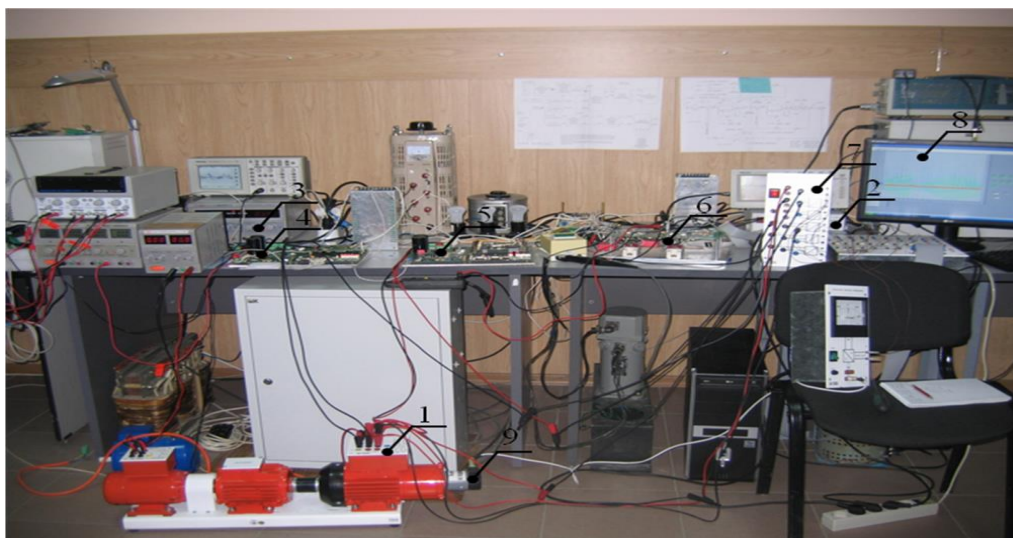


Рис. 8. Экспериментальная установка 1 – АД; 2,3 – ЗГ 1, ЗГ 2; 4,5 – АИН 1, АИН 2; 6 – СФНУ, 7 – ИБ, 8 – ПК, 9 – ДС

С целью проверки основных научных результатов диссертации были сняты выходные характеристики электропривода с прерывистым законом, при запуске на частоту $f_{ш} = 2$ Гц, при $L_{мех} = 2 \cdot 10^{-3}$ кг·м², $R_{мех} = 0,2$ Н·м·с/рад (рис. 9).

Исследования показали, что использование фазового способа возбуждения прерывистого режима работы позволяет стабилизировать внутри шага его амплитуду (характеристика – 1). Кроме того, при переходе с одного шага на другой отсутствуют переходные процессы, что существенно повышает координатную точность электропривода и снижает его динамические потери.

На рис. 10 представлены регулировочные характеристики, устанавливающие зависимость амплитуды координаты подвижного элемента электропривода χ_m от фазных напряжений при симметричном регулировании ($U_{s\alpha} = U_{s\beta} = \text{var}$) и изменении фазного напряжения только по одной из обмоток исполнительного

двигателя ($U_{s\alpha} = \text{const}, U_{s\beta} = \text{var}$), полученные в результате моделирования (1), расчетным путем (2), и экспериментально (3).

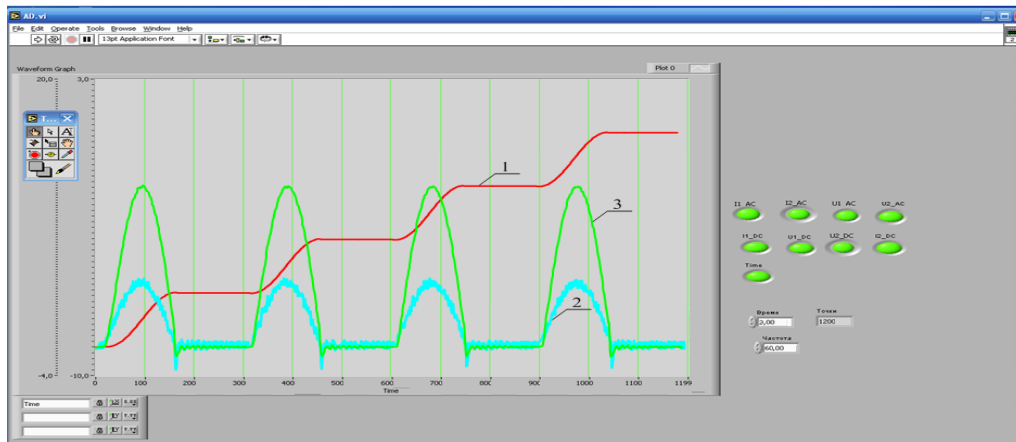


Рис. 9. Экспериментальные выходные характеристики электропривода с прерывистым законом движения: 1 – координата подвижного элемента электропривода $\chi(t)$, 2 – электромагнитный момент $M(t)$, 3 – скорость $\omega(t)$

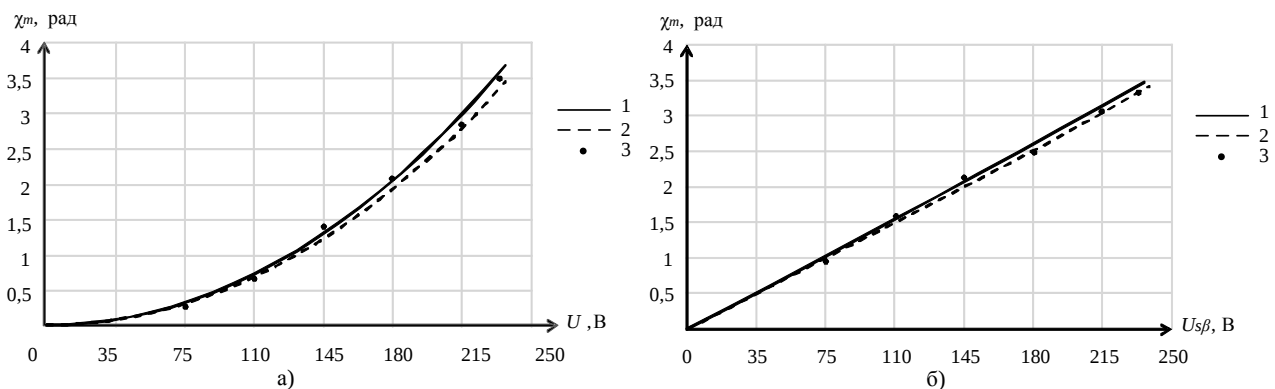


Рис. 10. Зависимость амплитуды координаты подвижного элемента электропривода при: а) – симметричном регулировании ($U_{s\alpha} = U_{s\beta} = \text{var}$) и б) при регулировании по одной из обмоток ($U_{s\alpha} = \text{const}, U_{s\beta} = \text{var}$)

Анализ полученных результатов показал, что расхождения между данными полученными расчетным путем (гл.2), при имитационном моделировании (гл.3) и экспериментальными исследованиями (гл.4) составляют от 7,5 до 8,5 %.

Данный факт подтверждает правомерность использования для расчетов рабочих характеристик электродвигателя, работающего в режиме прерывистого движения, ранее полученных в гл. 2 аналитических выражений, а также – адекватность разработанных имитационных моделей реальным физическим процессам, протекаемым в электромеханическом преобразователе энергии.

На рис. 11 представлены экспериментально полученные зависимости максимального значения относительной координатной погрешности δ_m , от отклонения амплитуды напряжения источника питания ΔU , частоты Δf при потенциальном питании.

Экспериментальные исследования подтвердили положение о том, что наибольшее влияние на относительную координатную погрешность оказывает

отклонение частоты питающей сети. Расхождения по полученным данным (между расчетными и экспериментальными) составили от 7 до 8 %.

Проведенные исследования позволили разработать технические предложения и наметить пути улучшения регулировочных свойств и повышение координатной точности асинхронных электроприводов с прерывистым режимом работы.

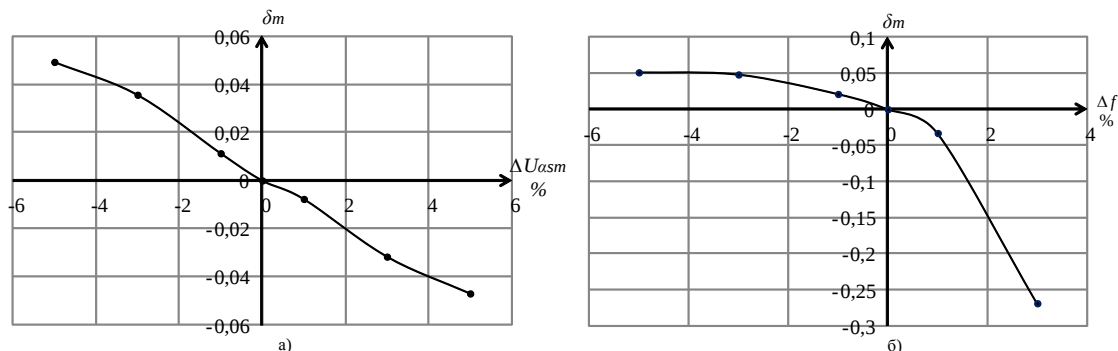


Рис. 11. Зависимость относительной координатной погрешности δ_m от отклонения: а) амплитуды напряжения источника питания ΔU ; б) частоты Δf при потенциальной фазовой модуляции

Так для обеспечения постоянства амплитуды координаты при регулировании частоты шага при заданных параметрах нагрузки, было предложено управлять асинхронным двигателем в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 12, а. Положительный эффект достигается за счет изменения коэффициента передачи модулятора МД при регулировании частоты шага по закону

$$k_{MD} = \frac{1}{2 \Omega \chi_{\max} G_2} \left\{ 2 \Omega \chi_{\max} [G_1 - 2 \pi \Omega \chi_{\max} G_2 G_3 - (G_1^4 - 4 \Omega \chi_{\max} G_1^2 G_2 G_3 - 4 \Omega^3 \chi_{\max}^2 G_2^2 L_{\text{мех}}^2)^{0,5}] \right\}^{0,5}$$

Функциональная схема, представленная на рис. 14, б позволяет расширить эксплуатационные возможности электроприводов с периодическим законом движения путем повышения его координатной точности за счет устранения высокочастотных пульсаций частоты сети и регулирования времени разгона подвижного элемента асинхронного двигателя до установившегося значения амплитуды шага.

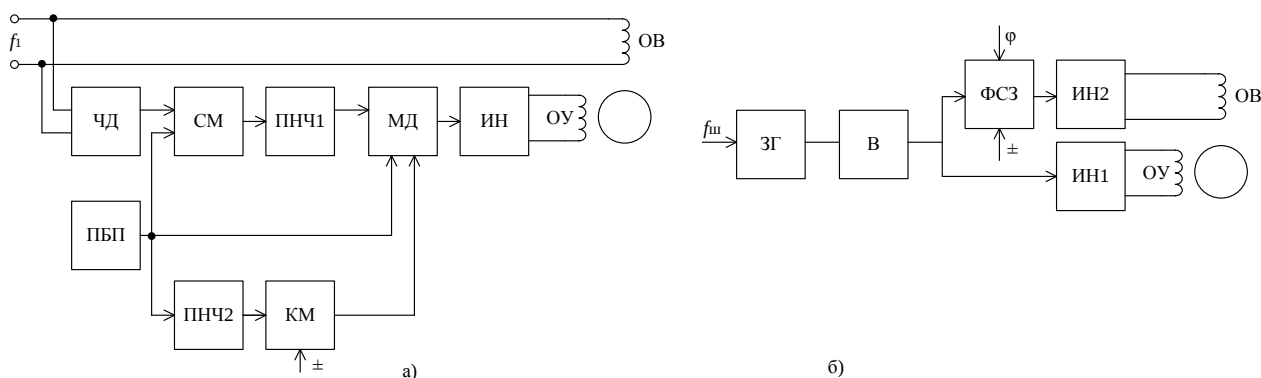


Рис. 12. Функциональная схема электропривода с прерывистым законом движения

В заключении изложены основные выводы по научным и практическим результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

В приложении приведены расчетные соотношения, а также акты внедрения результатов научно-исследовательской работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые получены аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязь между параметрами электрической машины, источниками питания и нагрузкой при потенциальной и токовой фазовой модуляции. Показано, что влияние параметров электрической машины и функций регулирования на кинематические и силовые характеристики привода осуществляется через коэффициенты пускового и демпфирующего электромагнитного момента.
2. Разработана методика определения выходных параметров электропривода с прерывистым законом движения при потенциальной и токовой фазовой модуляции.
3. Установлено, что при инженерных расчетах закона движения электропривода достаточно учитывать только постоянную составляющую коэффициента электромагнитного демпфирования, а в пусковом моменте – гармонические составляющие кратные частоте шага.
4. Получены аналитические зависимости рабочих характеристик электропривода с прерывистым движением, которые указывают на возможность альтернативного выбора параметров электрической машины и функций регулирования при заданных параметрах нагрузки для построения специализированных комплексов с требуемыми кинематическими и силовыми характеристиками.
5. Установлено, что в целях обеспечения линейности регулирования амплитуды шага и момента управление двигателем следует осуществлять только по одной из обмоток статора.
6. Показано, что, с целью поддержания постоянства амплитуды шага, напряжение на одной из фазных обмоток статора двигателя должно регулироваться прямо пропорционально частоте шага.
7. Сформулирован и аналитически определен критерий оценки точностных характеристик электропривода, работающего в режиме прерывистого движения за счет фазовой модуляции питающих напряжений (токов) по максимальному значению относительной координатной погрешности.
8. Установлено, что наибольший вклад в значение относительной координатной погрешности, практически превышающий на порядок остальные, при постоянстве параметров нагрузки вносит отклонение частоты питающей сети. В целях повышения координатной точности электропривода, реализующего фазовый способ возбуждения прерывистого закона движения, рекомендовано выполнять его по принципу синхронизации с частотой сети.
9. Разработаны имитационные модели электроприводов с прерывистым законом движения при потенциальной и токовой фазовой модуляции, что позволяет исследовать динамические режимы работы электроприводов данного класса.
10. Результаты моделирования показали, что наибольшее влияние на выходные характеристики электропривода оказывает демпфирующая составляющая

нагрузки. Так, в частности, при $R_{\text{мех}} \leq 0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с/рад}$ наблюдалась потеря динамической устойчивости, проявляющаяся в виде вращательно-колебательного режима работы, а при внедрении позиционной нагрузки – переход в колебательный режим работы.

11. Разработана экспериментальная установка электропривода с прерывистым законом движения, позволившая проверить адекватность математических моделей, методик расчета и результатов теоретического анализа.

12. Найдены новые технические решения, позволяющие расширить эксплуатационные возможности двухфазных асинхронных двигателей, работающих в режиме прерывистого движения за счет поддержания постоянства амплитуды шага при регулировании его частоты и повысить координатную точность на 15%, защищенные патентами на полезные модели.

Основные результаты работы опубликованы

в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Аристов А.В., Воронина Н.А. Рабочие характеристики электропривода колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Известия ТПУ. – 2009. – Т. 314. – №4. – С. 64–68.

2. Аристов А.В., Паюк Л.А., Воронина Н.А. Асинхронный электропривод с прерывистым движением подвижного элемента // Электричество. – 2009. – №12. – С. 41–44.

3. Аристов А.В., Воронина Н.А. Анализ точности позиционирования двухфазного асинхронного двигателя в режиме прерывистого движения // Известия ТПУ. – 2013. – Т. 322 – № 4. – С. 116–120.

Материалы конференций и сборников статей:

4. **Воронина Н.А.** Математическое представление процессов в асинхронных электроприводах с автономными инверторами напряжения// Современные техника и технологии: Материалы X-ой юбилейной международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (СТТ 2003), Т.1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 95–98.

5. **Воронина Н.А.** Электропривод колебательного движения с прерывистым законом движения// Современные техника и технологии: Материалы XV Международной научно-практической конференции студентов аспирантов и молодых ученых (СТТ 2009), Т.1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 385–386.

6. Аристов А.В., Воронина Н.А. Влияние параметров нагрузки на выходные характеристики электропривода с прерывистым законом движения// Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной научно-технической конференции, Томск: ТПУ, 2009. – С. 340–347.

7. **Воронина Н.А.** Закон движения электропривода с прерывистым движением при токовой фазовой модуляции// Современные техника и технологии: Материалы XVI Международной научно-практической конференции студентов аспирантов и молодых ученых (СТТ 2010), Т.1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 396–398.

8. Воронина Н.А., Аристов А.В., Закон движения электропривода с прерывистым движением при потенциальной и токовой фазовой модуляции// Элек-

троемеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник. – Уфа, 2010. – С. 42–47.

9. **Воронина Н.А.** Электропривод с прерывистым законом движения // Современные техника и технологии: Материалы XVII Международной научно-технической конференции студентов аспирантов и молодых ученых (СТТ 2011), Т.1 – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 422–423.

10. Аристов А.В., Воронина Н.А. Электропривод с прерывистым движением вала // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы V Юбилейной Международной научно-технической конференции, посвящённой памяти Г.А. Сипайлова; ТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С.195–200.

11. **Воронина Н.А.** Влияние параметров источников питания на кинематические характеристики электропривода с периодическим законом движения // Современные техника и технологии: Материалы XVIII Международной научно-практической конференции студентов аспирантов и молодых ученых (СТТ 2012), Т.1 – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 351–352.

12. Паюк Л.А., Воронина Н.А. Безредукторный электропривод периодического движения переменного тока // Наука, технологии, инновации: Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых в 7 частях. Часть 5, Новосибирск, 29 ноября-2 декабря 2012. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С. 306–310.

Патенты и авторские свидетельства:

13. Патент на полезную модель №88874, МПК H02P 7/00. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения / Аристов А.В., **Воронина Н.А.** Заявка 2009125766/22, 06.07.2009. Опубликовано 20.11.2009, Бюл. №32

14. Патент на полезную модель №131254, МПК H02P7/62. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме прерывистого движения / Аристов А.В., **Воронина Н.А.** Заявка № 2013106076 . Опубликовано 10.08.2013, Бюл. №22.

Личный вклад автора

Публикации [4, 5, 7, 9] выполнены без соавторства. В работах, выполненных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: определение аналитических выражений закона движения электропривода с прерывистым законом движения при потенциальном питании [1, 2, 12, 13, 14] (30%), определение соотношений для оценки точности позиционирования асинхронного двигателя, работающего в режиме прерывистого движения [3] (45%), анализ влияния параметров нагрузки на выходные характеристики электропривода с прерывистым законом движения при потенциальной фазовой модуляции [6] (50%), анализ влияния параметров нагрузки на выходные характеристики электропривода с прерывистым законом движения при токовой фазовой модуляции [11] (50%), определение аналитических выражений закона движения электропривода с прерывистым законом движения при токовой фазовой модуляции [8, 10] (50%).