

На правах рукописи



Нагорный Василий Олегович

**АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПУЛЬСИРУЮЩЕГО
ДВИЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» на кафедре электропривода и электрооборудования Энергетического института и АО «Научно-производственный центр «Полус».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Аристов Анатолий Владимирович

Официальные оппоненты:

Семыкина Ирина Юрьевна
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Кузбасский
государственный технический
университет имени Т. Ф. Горбачева»,
директор института энергетики

Орлов Юрий Александрович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Томский
государственный архитектурно-
строительный университет», и. о.
заведующего кафедрой «Общей
электротехники и автоматики»

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО Сибирский федеральный
университет, г. Красноярск

Защита диссертации состоится 29 декабря 2016 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.11 при ФГАОУ ВО «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, аудитория 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национального исследовательского Томского политехнического университета» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2801/worklist>

Автореферат разослан « » ноября 2016 г.

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

Ю. Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Электроприводы с периодическим законом движения нашли широкое применение в оптических сканаторах, в приводах антенн радиолокаторов, в горной и химической промышленности, в медицине и т. д. Обычно в них, для получения пульсирующего движения, используются серийные электродвигатели постоянного или переменного тока со специальным редуктором. Однако наличие последнего звена вносит дополнительные механические потери, а в случае оптико-механических системах со сканированием погрешность в определении направления на объект и существенное снижение частоты сканирования.

Уменьшить данные недостатки и существенно расширить динамический диапазон работы, обеспечив высокие энергетические характеристики можно с помощью привода, построенного на базе двухфазного асинхронного электродвигателя (АД), работающего непосредственно в режиме периодического движения за счет фазовой или амплитудной модуляции питающих напряжений, с прерыванием одного из них в моменты времени, когда развиваемый двигателем электромагнитный момент переходит через ноль.

Значительный вклад в изучение, разработку и совершенствование электроприводов периодического движения внесли Луковников В. И., Ивоботенко Б. А., Грачев С. А., Ткалич С. А., Мамедов Ф. А., Чиликин М. Г., Lawrenson P. J., Harris M. R., Аристов А. В., Воронина Н. А., Красовский А. Б., Хромов Е. В. Однако в их трудах пульсирующий режим работы асинхронного электропривода рассматривался не очень подробно или не рассматривался вовсе. Исследование пульсирующего режима работы асинхронного электропривода позволит расширить эксплуатационные возможности двухфазных АД за счёт использования их непосредственно в режиме пульсирующего перемещения.

Цель работы. Решение основных вопросов теории асинхронных электроприводов углового движения с пульсирующим движением вала и разработка на её основе научно обоснованных рекомендаций по их проектированию, изготовлению, настройке и промышленному применению.

Объектом исследования является асинхронный электропривод, работающий непосредственно в режиме пульсирующего движения за счёт фазовой или амплитудной модуляции питающих напряжений с прерыванием одного из них в моменты времени, когда развиваемый двигателем электромагнитный момент переходит через ноль.

Предметом исследования являются выходные и энергетические характеристики асинхронного электропривода пульсирующего движения.

Методы исследования. Используются современные методы численного и аналитического решения систем линейных дифференциальных уравнений, методы теории матричного исчисления, имитационного моделирования электромеханических систем в среде MATLAB и MATLAB Simulink.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Показана перспективность использования АД с потенциальной фазовой и амплитудной модуляцией фазных напряжений для создания регулируемых электроприводов углового движения с пульсирующим движением вала.

2. Впервые установлены неизвестные ранее аналитические связи между выходными параметрами электропривода с пульсирующим законом движения и параметрами электрической машины, источников питания и его нагрузкой при фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений, на основании которых создана методика расчёта выходных параметров асинхронного электропривода с пульсирующим движением вала.

3. Разработаны математические модели электроприводов с пульсирующим законом движения, позволяющие исследовать динамические и энергетические характеристики электропривода при потенциальном питании, учитывающие параметры источников питания, нагрузки и АД.

4. Предложен усовершенствованный способ управления импульсным преобразователем напряжения по балансу необходимой и накопленной энергии для электропривода пульсирующего движения, позволяющий минимизировать время переходного процесса.

5. Найдены новые способы расширения эксплуатационных возможностей двухфазного асинхронного двигателя, работающего в режиме пульсирующего движения путём повышения его координатной точности за счёт устранения высокочастотных пульсаций двойной частоты питающей сети и формирования прямоугольного режима пульсаций, защищенные патентами Российской Федерации.

Практическая ценность работы:

1. Разработан импульсный преобразователь напряжения для электропривода с малым временем переходных процессов и алгоритм управления им.

2. Выработаны инженерно-практические рекомендации по разработке импульсных преобразователей напряжения, реализующих способ управления по балансу необходимой и накопленной в системе энергии, в составе асинхронного электропривода с прерывистым законом движения.

3. Созданы имитационные модели для анализа и синтеза динамических и энергетических характеристик асинхронного электропривода с пульсирующим законом движения.

4. Найдены новые технические решения для построения электроприводов пульсирующего движения с расширенными эксплуатационными возможностями за счет фазовой или амплитудной модуляции питающих напряжений, с прерыванием одного из них в моменты времени, когда развиваемый двигателем электромагнитный момент переходит через ноль.

Реализация результатов работы. Основные научно-практические результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях ООО «Сибметакхим» г. Томска, подразделения ОАО «Газпром», Акционерное

общество «Научно-производственный центр «Полус» г. Томска, а также в учебный процесс при выполнении курсовых и дипломных работ студентами кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института ТПУ, что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Основные положения работы, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости, устанавливающие взаимосвязи между выходными параметрами электропривода с пульсирующим законом движения и параметрами электрической машины, источников питания и его нагрузкой при фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений.

2. Математические модели электропривода с пульсирующим законом движения, позволяющие исследовать динамические и энергетические характеристики электропривода при потенциальных видах питания.

3. Способ и алгоритмы управления импульсным преобразователем напряжения для питания электропривода с пульсирующим законом движения.

4. Принципы построения электроприводов пульсирующего движения с расширенными эксплуатационными возможностями за счет фазовой или амплитудной модуляции питающих напряжений, с прерыванием одного из них в моменты времени, когда развиваемый двигателем электромагнитный момент переходит через ноль.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и получили одобрение: на VI Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2013 г.); на VII Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2015 г.); на Международной научной конференции «Решетнёвские чтения» (г. Красноярск, 2014 г.) на XI Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON – 2015 (г. Омск, 2015 г.), Интеллектуальные энергосистемы – 2016 (г. Томск, 2016 г.).

Публикации. Основные положения диссертации и результаты выполненных исследований отражены в 8 печатных работах. Из них 3 статьи в изданиях из перечня, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в информационной базе SCOPUS, 4 статьи в сборниках докладов на Международных научно-технических конференциях и 2 патентах на полезную модель.

Структура и объём. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, списка литературы и приложения. Общий объём работы составляет 208 страниц машинописного текста, включая 75 рисунков, 16 таблиц, списка использованной литературы из 114 наименований и 5 приложений на 64 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований, приведены сведения о научной значимости и практической ценности, реализации и апробации работы, представлена структура диссертации.

В первой главе определены задачи исследования, приведён анализ требований, предъявляемых к электроприводам с периодическим законом движения. Отмечается, что использование двухфазного АД действующего непосредственно в режиме периодического движения за счет фазовой или амплитудной модуляции питающих напряжений с прерыванием одного из них тогда, когда электромагнитный момент переходит через ноль, позволяет отказаться от редуктора в электроприводе пульсирующего движения.

Рассмотрено современное состояние вопроса в области оценки энергетических характеристик электропривода периодического движения. А именно: проанализировано влияние способов возбуждения периодического режима работы на энергетику привода. Приведены критериальные оценки эффективности работы электропривода с пульсирующим законом движения.

Во второй главе представлено математическое описание электродвигателя с пульсирующим законом движения при потенциальной фазовой и амплитудной модуляции, а также при питании одной из обмоток двигателя постоянным напряжением. Аналитически определены выходные параметры электропривода с пульсирующим законом движения в зависимости от функций регулирования и нагрузки. Представлены энергетические соотношения в асинхронном колебательном электродвигателе при потенциальном питании.

Модель обобщённого электродвигателя, работающего в режиме пульсирующего движения в системе координат α, β описывается следующей системой дифференциальных уравнений –

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

где $U_{\alpha s}(t), U_{\beta s}(t), i_{\alpha s}, i_{\beta s}, i_{\alpha r}, i_{\beta r}$ – 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_{α}, M_{β} – взаимоиנדуктивности между статорными и роторными обмотками по координатным осям α, β ; ω – скорость изменения обобщённой координаты подвижного элемента; $M_{\text{эм}}, M_{\text{н}}$ – обобщённые электромагнитное усилие и нагрузка; k_d – обобщённый силовой коэффициент.

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

Так при фазовом потенциальном питании, для получения пульсирующего режима работы статорные обмотки асинхронного двигателя подключаются к источникам напряжения:

$$U_{\alpha s}(t) = U_{m1} \cos(\omega_1 t) \cdot A(t);$$

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

где U_{m1} , U_{m2} – амплитудные значения питающих напряжений; ω_1 , ω_2 – круговые частоты питающих напряжений; γ – начальная фаза питающего напряжения по обмотке β ; $A(t)$ – функция, определяемая как:

$$A(t) = \begin{cases} 1 & \text{если } \sin \Omega t > 0; \\ 0 & \text{если } \sin \Omega t \leq 0, \end{cases}$$

где Ω – циклическая частота пульсаций.

В режиме, когда одна из обмоток АД питается постоянным напряжением, напряжения фаз могут быть записаны как:

$$U_{\alpha s}(t) = U_{m1} \cdot A(t);$$

$$U_{\beta s}(t) = U_{m2},$$

Этот режим является частным случаем режима фазовой модуляции питающих напряжений, когда $\omega_1 = \omega_2 = 0$ и $\gamma = \pi / 2$.

При амплитудной модуляции питающих напряжений законы изменения напряжений в зависимости от времени задаются в виде:

$$U_{\alpha s}(t) = U_{m1} \sin(\omega_1 t) \cos(\Omega t);$$

$$U_{\beta s}(t) = U_{m2} \cos(\omega_1 t) \cdot A(t),$$

Решение первых четырёх уравнений системы относительно токов может быть представлено как:

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

где $i_1(t) = i_{\alpha s}(t)$, $i_2(t) = i_{\beta s}(t)$, $i_3(t) = i_{\alpha r}(t)$, $i_4(t) = i_{\beta r}(t)$; $q_l(p)$ – операторные полиномы числителей питающих напряжений, $Q_l(p)$ – операторные полиномы знаменателей питающих напряжений, $U_l(p) = q_l(p) / Q_l(p)$ – операторные изображения питающих напряжений, $a_{ln}(p)$ – минор элемента операторного определителя системы, $\det(A(p))$ – определитель четвёртого порядка системы, p_h – корни полиномов $Q_l(p)$ и $\det(A(p))$, $[]^*$ – комплексно-сопряжённые выражения.

Так, для обмоток статора и ротора по оси α они определены как:

$$i_{\alpha s}(t) = U_{m1} \left(\begin{aligned} & T_{11} \sin(\omega_1 t + \delta_{11}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{21k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{21k}) + \right. \\ & \left. + T_{31k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{31k}) \right) \end{aligned} \right) +$$

$$+ U_{m2} T_{41} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{41});$$

$$i_{\alpha r}(t) = U_{m1} \left(\begin{aligned} & T_{13} \sin(\omega_1 t + \delta_{13}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{23k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{23k}) + \right. \\ & \left. + T_{33k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{33k}) \right) \end{aligned} \right) +$$

$$+ U_{m2} T_{43} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{43}).$$

где T – амплитудные коэффициенты гармонических составляющих токов, δ – начальные фазы гармонических составляющих токов.

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

Наиболее часто на практике нагрузкой электропривода является совокупность позиционных и инерционных сил, а также сил жидкостного и сухого трения:

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

где $L_{\text{мех}}$ – инерционная составляющая нагрузки, $R_{\text{мех}}$ – демпфирующая составляющая нагрузки, $C_{\text{мех}}$ – позиционная составляющая нагрузки, $M_{\text{тр}}$ – момент трения нагрузки, χ – перемещение выходного элемента привода.

Разрешив последнее уравнение системы относительно перемещения, методом гармонического баланса закон движения был получен в виде:

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

где χ – амплитуды гармонических составляющих закона движения, α – начальные фазы гармонических составляющих закона движения, Ω – частота пульсаций. Для случая питания одной из обмоток АД постоянным напряжением закон движения подвижного элемента двигателя описывается выражением:

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

С целью проверки методики расчёта и правильности полученных инженерных соотношений была проведена их сравнительная оценка с результатами математического моделирования электропривода, выполненного на базе асинхронного двигателя АИР71А2 в программной среде MATLAB.

В качестве примера представлены токи обмотки статора АД по оси α (рис. 1а) и законы изменения координаты положения подвижного элемента привода $\chi(t)$ (рис. 1б), где кривые 1 соответствуют результатам расчета, а кривые 2 – результатам математического моделирования. 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.

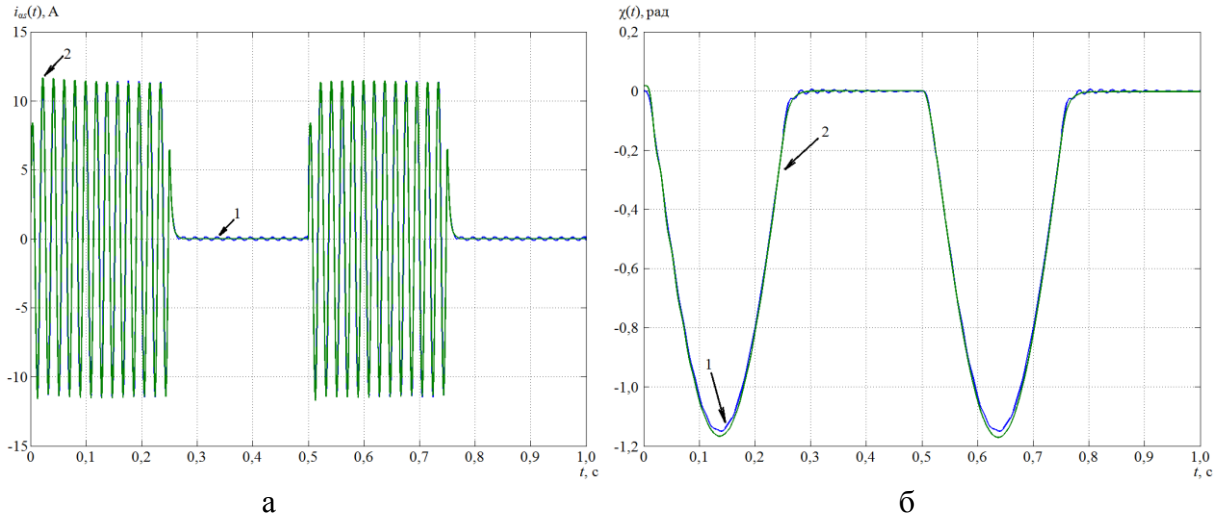


Рис. 1. Законы изменения: а – тока фазы $i_{\alpha s}(t)$ асинхронного двигателя; б – координаты подвижного элемента привода $\chi(t)$ (1 – результаты аналитического расчёта; 2 – результаты математического моделирования)

Для случая амплитудной модуляции питающих напряжений токи фаз АД могут быть представлены в виде:

$$i_{\alpha s}(t) = U_{m1} (T_{11} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{11}) + T_{21} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{21})) + \\ + T_{31} \sin(\omega_1 t + \delta_{31}) + \\ + U_{m2} \left(+ \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{41k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{41k}) + \right. \right. \\ \left. \left. + T_{51k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{51k}) \right) \right) ;$$

$$i_{\alpha r}(t) = U_{m1} (T_{13} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{13}) + T_{23} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{23})) + \\ + T_{33} \sin(\omega_1 t + \delta_{33}) + \\ + U_{m2} \left(+ \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{43k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{43k}) + \right. \right. \\ \left. \left. + T_{53k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{53k}) \right) \right) ;$$

Разрешив пятое уравнение системы, для случая амплитудной модуляции питающих напряжений, относительно перемещения, подобно тому, как это было сделано ранее, закон движения был получен в виде:

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

Проверка в программной среде MATLAB подтвердила адекватность методики расчёта и правильность полученных соотношений подобно тому, как это было сделано для случая фазовой модуляции питающих напряжений (рис. 2).

В качестве иллюстрации на рис. 2б представлен закон изменения координаты положения подвижного элемента привода. Здесь расхождение расчётных данных (кривая 1) и результатов математического моделирования (кривая 2) не превышает 8 %.

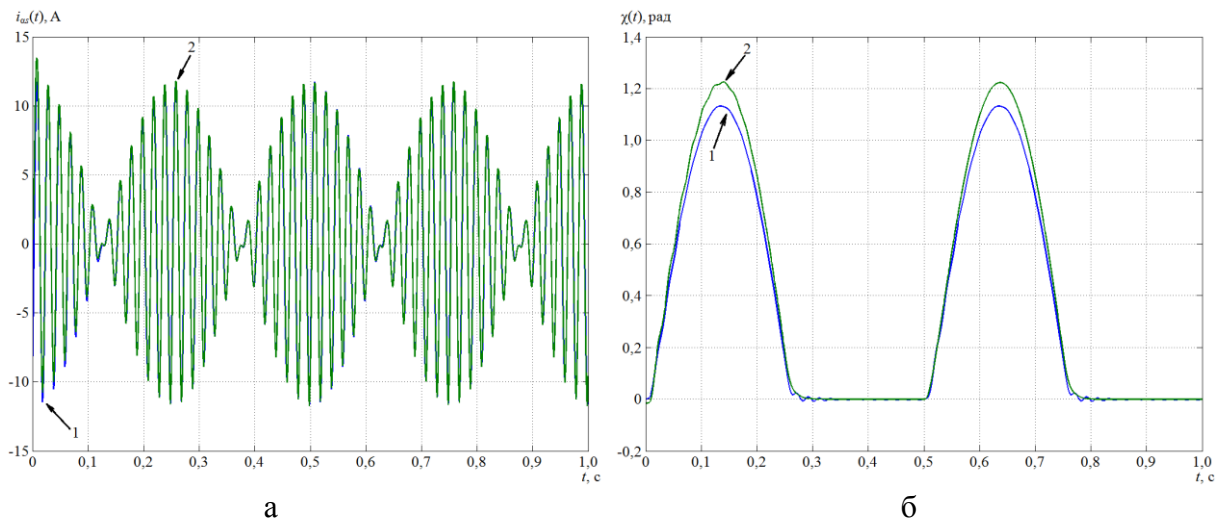


Рис. 2. Законы изменения: а – тока фазы $i_{\alpha s}(t)$ асинхронного двигателя; б – координаты подвижного элемента привода $\chi(t)$ (1 – результаты аналитического расчёта; 2 – результаты математического моделирования)

Полученные уравнения позволяют на первом этапе рассчитать выходные параметры электропривода при различных видах потенциальной модуляции фазных напряжений.

В качестве основной оценки эффективности работы электропривода пульсирующего движения предложено использовать обобщённый КПД, который может быть найден как отношение полной механической мощности S_2 к активной составляющей электрической мощности P_1 на периоде:

$$\eta = \frac{S_2}{P_1} .$$

Активная составляющая электрической мощности на периоде определялась как:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\alpha s}(t) i_{\alpha s}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T U_{\beta s}(t) i_{\beta s}(t) dt .$$

Полная механическая мощность рассчитывалась согласно выражению:

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} ,$$

где P_2 и Q_2 – активная и реактивная составляющая механической мощности соответственно рассчитываются по выражениям:

активная составляющая

$$P_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} M_{mk} \omega_{mk} \cos(\varphi_k - \alpha_k) ;$$

реактивная составляющая

$$Q_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} M_{mk} \omega_{mk} \sin(\varphi_k - \alpha_k) .$$

Здесь M_{mk} , ω_{mk} – амплитудные значения гармонических составляющих электромагнитного момента и скорости соответственно; $\varphi_k - \alpha_k$ – угол сдвига фаз между электромагнитным моментом и скоростью.

На рис. 3 представлены зависимости полной механической мощности от времени для режимов ФМ и АМ, полученные при расчёте.

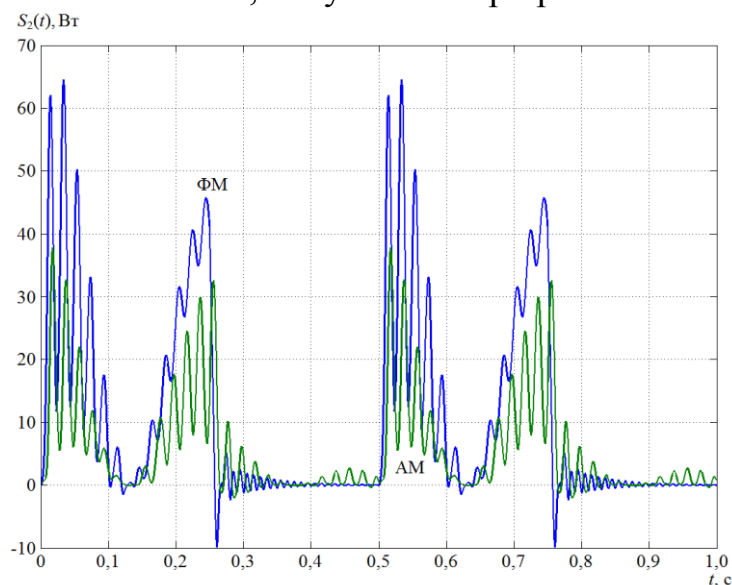


Рис. 3. Полная механическая мощность в режимах ФМ и АМ

Установлено, что выражения для оценки энергетических характеристик справедливы как для режима потенциальной фазовой модуляции (ФМ), так и для режима амплитудной модуляции (АМ), хотя окончательный вид их для режимов ФМ и АМ различен и обуславливается амплитудами составляющих электромагнитного момента и скорости.

Третья глава посвящена разработке импульсных преобразователей напряжения для электропривода с пульсирующим законом движения. Рассмотрены способы управления преобразователями напряжения с широтно-импульсной модуляцией. Приведено математическое описание преобразователя напряжения.

Для питания электропривода пульсирующего движения в режиме, когда одна из его обмоток питается постоянным напряжением, был разработан импульсный преобразователь напряжения (ПН).

При работе ПН система управления (рис. 4) собирает информацию о текущем токе нагрузки (i_n), токе дросселя (i_L) и напряжении нагрузки (U_n) и управляет работой ключевого элемента VT, выдавая сигнал управления F_y на драйверу. Драйвер, в свою очередь, управляет транзистором VT при помощи сигнала F_k . Сигнал синхронизации F_c служит для организации параллельной работы ПН (если требуется).

Наиболее распространённым и легко реализуемым, на практике, алгоритмом является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм цифрового регулятора.

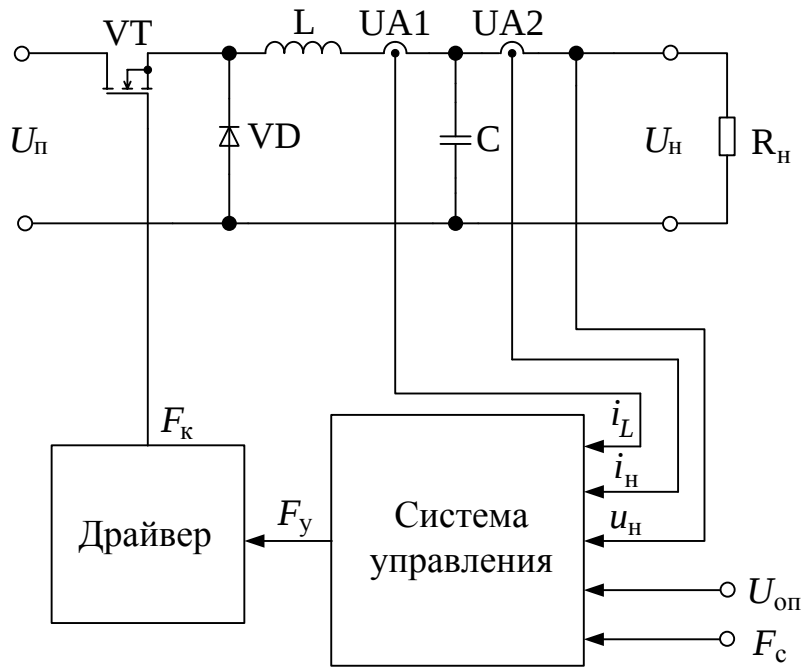


Рис. 4. Схема импульсного преобразователя напряжения

При использовании ПИД-регулятора управление преобразователем осуществляется согласно выражению:

$$u(n) = K_p E(n) + K_i \sum_{k=0}^n E(k) + K_d \frac{E(n) - E(n-1)}{T} = P + I + D ;$$

где $u(n)$ – коэффициент заполнения широтно-импульсной модуляции на шаге n ; $E(n)$ – ошибка регулирования на шаге n ; K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального регулятора соответственно; T – период дискретизации; P , I , D – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющая регулятора.

Альтернативой ПИД-регулятору является управление по балансу необходимой и накопленной в системе энергии.

Реализация управления по балансу необходимой и накопленной энергии была рассмотрена на примере ПН, представленном на рис. 9, в котором текущее значение накопленной LC-фильтром энергии можно определить как:

$$W = \frac{C}{2} U_n^2(t) + \frac{L}{2} (i_L(t) - i_n(t))^2 \text{sign}(i_L(t) - i_n(t)) ,$$

где L , C – индуктивность дросселя и ёмкость конденсатора LC-фильтра; $U_n(t)$ – выходное напряжение; $i_L(t)$ – ток дросселя; $i_n(t)$ – ток нагрузки; $\text{sign}(i_L(t) - i_n(t))$ – знак пульсирующей составляющей энергии дросселя.

Было принято, что переключение ключевого элемента (VT) осуществляется по смене знака баланса между текущим значением энергии, запасённой непрерывной частью ПН (LC-фильтром), и значением энергии LC-

фильтра в установившемся режиме. Тогда, преобразовав уравнение энергетического баланса закон управления был представлен в виде

$$F_3 = (U_H^2(t) - U_{оп}^2) + \rho^2 (i_L(t) - i_H(t))^2 \operatorname{sign}(i_L(t) - i_H(t));$$

$$F_K = \begin{cases} 1 & \text{при } F_3 < 0; \\ 0 & \text{при } F_3 > 0, \end{cases}$$

где $F_3 = \frac{2}{C} \left(W - \frac{CU_{оп}^2}{2} \right)$ – сигнал, пропорциональный текущему значению баланса между запасённой LC-фильтром энергией и энергией $\frac{CU_{оп}^2}{2}$, которая необходима LC-фильтру при выходном напряжении, равном заданному $U_H = U_{оп}$, и нулевом значении тока конденсатора $i_C(t) = i_L(t) - i_H(t) = 0$;

$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление LC-фильтра; $U_{оп}$ – заданное напряжение; F_K – состояние VT (при $F_K = 1$ включен, при $F_K = 0$ выключен).

При широтно-импульсной модуляции с формируемым генератором пилообразного напряжения сигналом развертки $Y_p = A_p([t / T] - 1)$, где A_p – амплитуда; $[t / T]$ – дробная часть отношения t / T ; T – длительность периода широтно-импульсной модуляции, управление осуществлялось синхронизирующим F_c и управляющим F_y сигналами.

При модуляции заднего фронта импульса закон управления примет вид:

$$F_y = F_3 + Y_p ;$$

$$F_K = \begin{cases} 1 & \text{при } t_n < t < t_{nk} \\ 0 & \text{при } t_{nk} < t < t_{n+1} \end{cases} ,$$

Так как индуктивность дросселя фильтра реального ПН может изменяться в процессе работы, то имеет смысл, во время работы ПН, оценивать текущее значение индуктивности.

Оценка индуктивности при замкнутом силовом ключе проводилась согласно выражению: $L(n) = \frac{t(n) - t(n-1)}{(I_L(n) - I_L(n-1))} (U_{п} - U_H)$, а если силовой ключ разомкнут: $L(n) = \frac{t(n) - t(n-1)}{I_L(n-1) - I_L(n)} U_H$, где $L(n)$ – индуктивность дросселя на n -ом шаге; $t(n)$, $t(n-1)$ – время на шаге n и $n-1$ соответственно; $I_L(n)$, $I_L(n-1)$ – ток дросселя на шаге n и $n-1$.

Так как для вычисления по второму выражению не требуется датчик входного напряжения, то в алгоритме управления ПН использовалось именно последнее выражение. Чтобы уменьшить влияние погрешности измерения индуктивности на результат, окончательное значение индуктивности оценивалось после усреднения полученных ранее данных: $L = a_1 L + b_1 L(n)$, где a_1 , b_1 – коэффициенты.

Выражение, является уравнением фильтра нижних частот первого порядка с бесконечной импульсной характеристикой.

На рис. 5 представлены результаты исследований работы ПН в типовых динамических режимах.

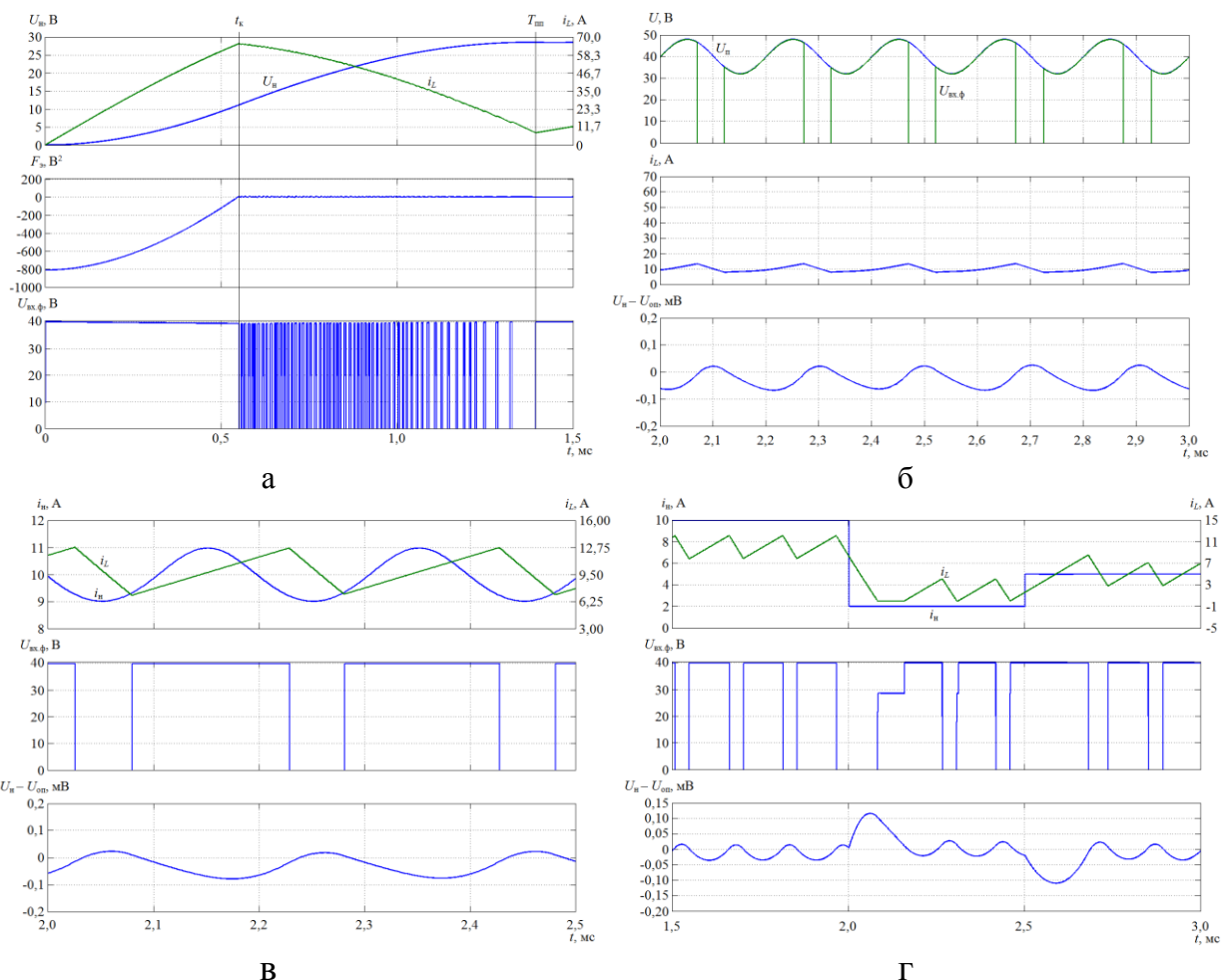


Рис. 5. а – переходный процесс преобразователя при включении с нулевых начальных условий; б – влияние синусоидальной помехи по цепи питания на выходное напряжение; в – влияние синусоидального изменения тока нагрузки на выходное напряжение; г - скачкообразное уменьшение и увеличение нагрузки

Показано, что алгоритм динамической коррекции индуктивности можно использовать для организации «плавного запуска» ПН. Для этого начальное значение индуктивности фильтра предложено завязать на порядок. При работе с «неправильным» значением индуктивности система управления будет искусственно затягивать переходные процессы, не давая, тем самым, развиваться большим токам при запуске преобразователя. Спустя некоторое время алгоритм скорректирует значение индуктивности, и преобразователь будет работать, с реальной индуктивностью дросселя.

В четвёртой главе рассмотрено математическое моделирование электропривода периодического движения. Приведена имитационная модель электропривода, сделан анализ энергетических характеристик при потенциальных видах модуляции. Оценено влияние асинхронного двигателя на энергетические показатели электропривода колебательного движения. Проведён анализ влияния параметров нагрузки на энергетику асинхронного двигателя. Представлены зависимости энергетических параметров электропривода колебательного движения от параметров источника питания.

Модель электропривода пульсирующего движения в математической среде Simulink представлена на рис. 6.

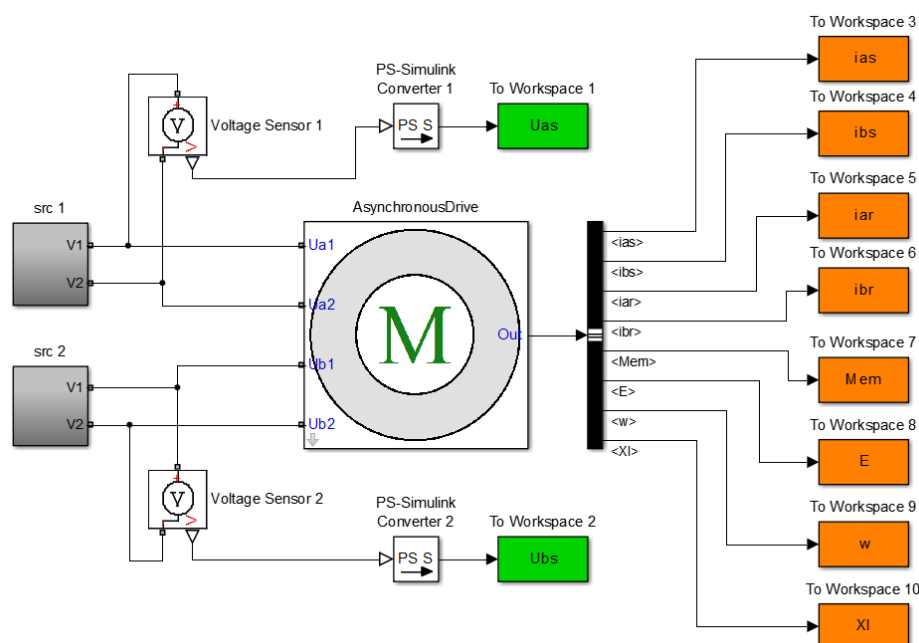


Рис. 6. Имитационная модель электропривода пульсирующего движения в математической среде Simulink

Она включает src1, src2 – источники питания обмоток фаз двухфазного асинхронного двигателя AsynchronousDrive. Блоки To Workspace предназначены для вывода в рабочую среду MATLAB информации о переменных Uas, Ubs (напряжения обмоток фаз статора); ias, ibs (токи фаз статора); iar, ibr (токи фаз ротора); Mem (электромагнитный момент электрической машины); E (угловое ускорение); w (угловая скорость); XI (координата положения вала двигателя).

Модель импульсного преобразователя напряжения (рис. 7) содержит силовой транзистор VT1, диод VD1, дроссель фильтра L1, конденсатор фильтра C1, датчики тока UA1, UA2, датчик напряжения UV1, систему управления ПН Control.

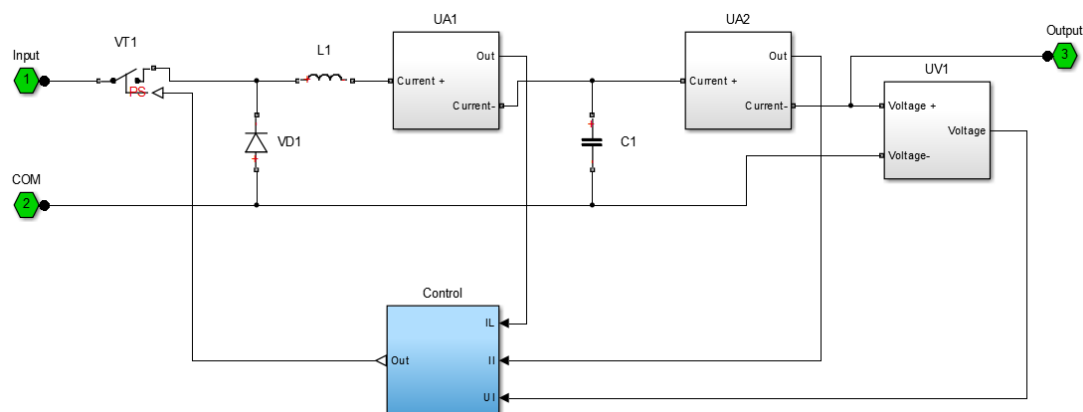


Рис. 7. Модель импульсного преобразователя напряжения

Во время работы ПН значения тока дросселя, тока нагрузки и напряжения нагрузки поступают в систему управления Control (рис. 8), которая управляет силовым транзистором VT1.

Для интеграции системы управления ПН с математической моделью Simulink был выбран подход, при котором код системы управления выполняется на персональном компьютере. Система управления ПН выполнена в виде Level-2 MATLAB S-функции (рис. 8). При создании системы управления моделью использовался язык С.

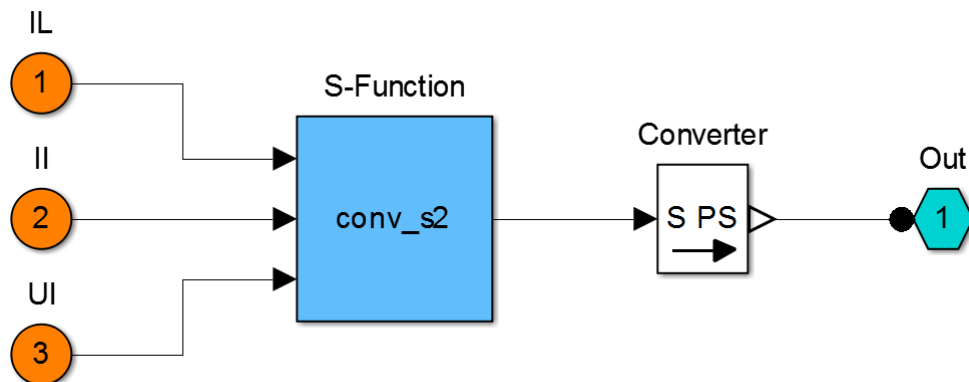


Рис. 8. Система управления импульсным преобразователем напряжения

Согласно блок-схеме алгоритма работы модели (рис. 9) S-функция представляет собой динамически компокуемую библиотеку (dll), экспортирующую функцию mexFunction. Функция mexFunction вызывается каждый раз, когда необходимо взаимодействие вычислителя Simulink с S-функцией.

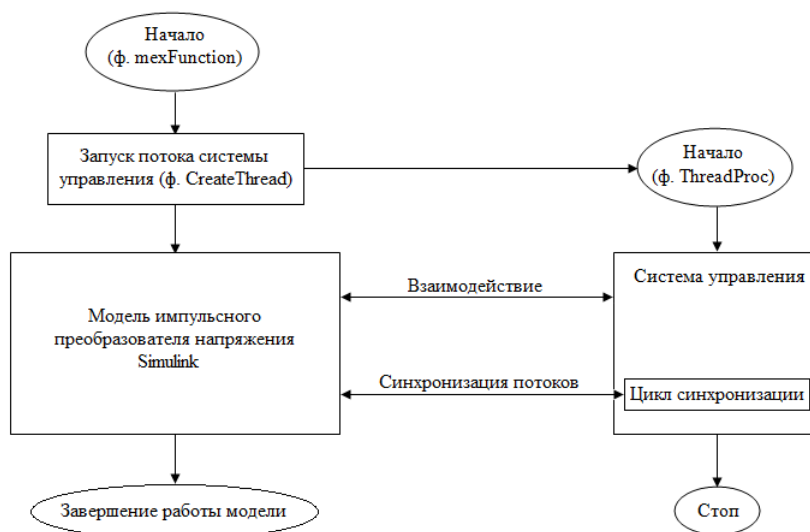


Рис. 9. Блок схема алгоритма работы математической модели ПН

При запуске математической модели S-функция (при помощи функции CreateThread) запускает поток, в котором будет выполнен код системы управления ПН.

Расчёт модели происходит в контексте двух потоков операционной системы. Так как потоки модели выполняются параллельно, то они вынуждены самостоятельно вести учёт времени работы модели. Для синхронизации времён работы потоков модели введен цикл синхронизации. При этом ведущим

является поток, созданный средой MATLAB, а ведомым – поток системы управления.

Через заданный промежуток времени модель завершит работу, остановив поток системы управления. В математической модели ПН и в лабораторном макете используется один и тот же исходный код системы управления, не требующий модификации при своем переносе.

На рис. 10 представлены результаты математического моделирования, полученные при помощи описанной выше модели.

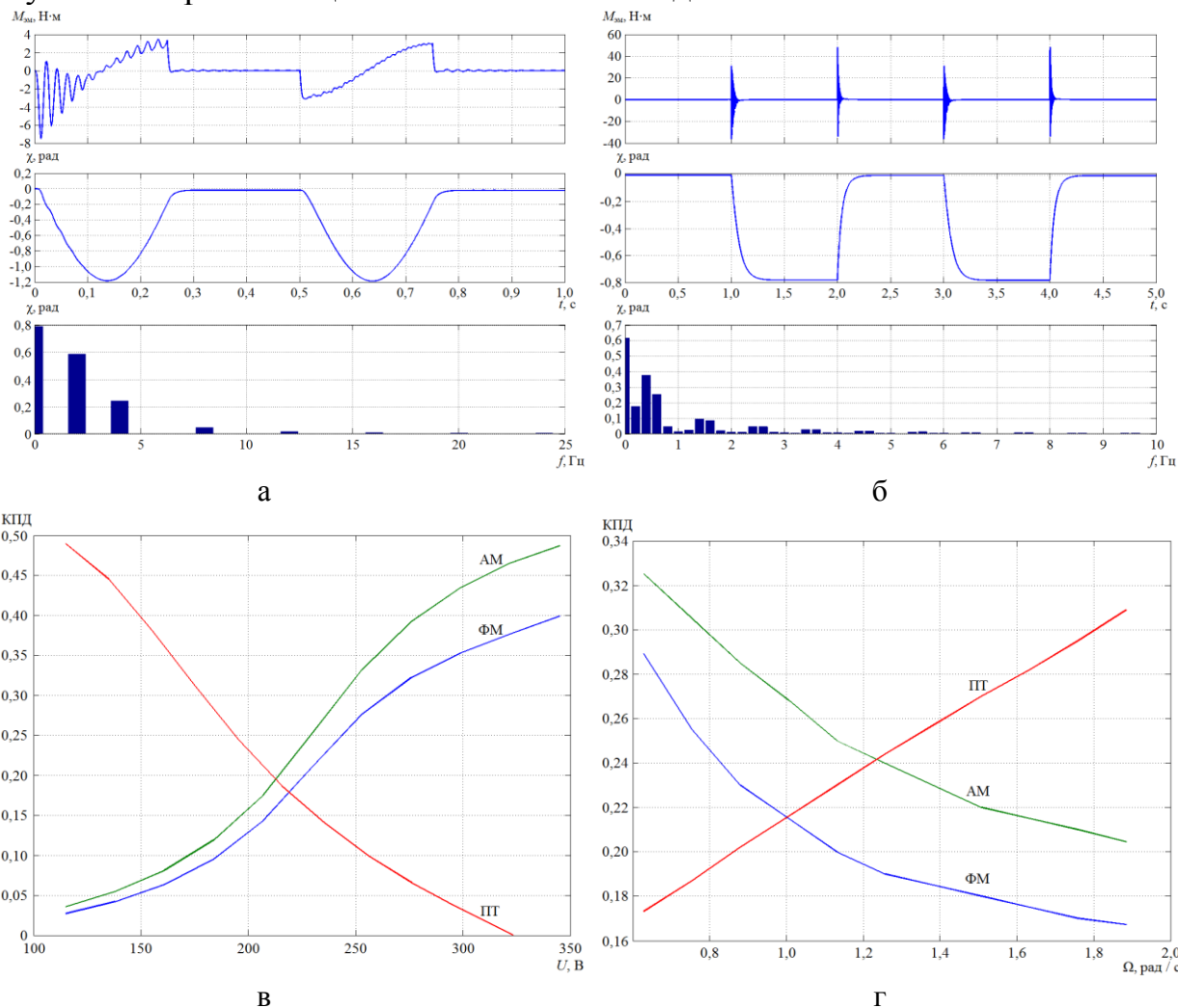


Рис. 10. а – электромагнитный момент $M_{эм}(t)$ и перемещение выходного элемента привода $\chi(t)$ в режиме пульсирующего движения при фазовой модуляции питающих напряжений при запуске на частоту $\Omega = 4\pi$ рад / с; б – электромагнитный момент $M_{эм}(t)$ и закон движения выходного элемента привода $\chi(t)$ в режиме пульсирующего движения при питании одной из обмоток АД постоянным напряжением при запуске на частоту $\Omega = \pi$ рад / с; в – зависимости КПД привода от действующего значения напряжения питания машины г – зависимости КПД привода от частоты пульсаций

На рис. 11 представлен закон движения подвижного элемента привода, при ненулевой позиционной составляющей момента нагрузки, полученный при помощи математической модели рис. 6. Установлено, что введение даже незначительной позиционной составляющей в нагрузку электропривода

пульсирующего движения, приводит к потере им статической устойчивости и переходу двигателя в колебательный режим работы (рис. 11).

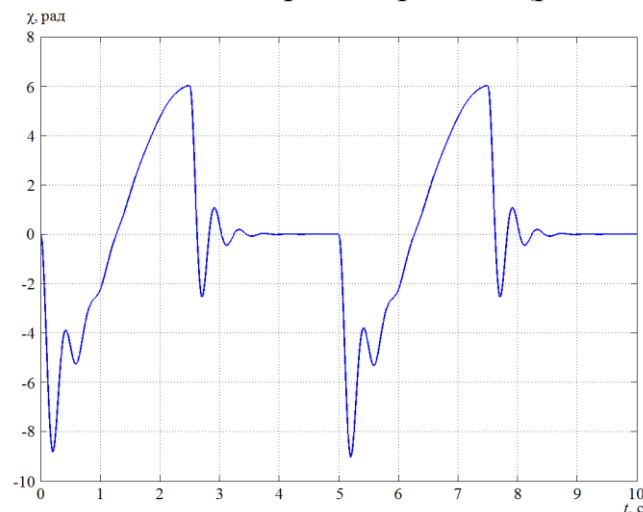


Рис. 11. Закон движения подвижного элемента привода при ненулевом позиционном коэффициенте нагрузки: $R_{\text{мех}} = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$, $C_{\text{мех}} = 0,5 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{рад}$ и $\Omega = 0,4 \cdot \pi \text{ рад} / \text{с}$

Пятая глава содержит данные экспериментальных исследований и результаты внедрения энергосберегающего электропривода периодического движения. Приведено: описание экспериментальной установки, результаты экспериментальных исследований и их анализ, и практические разработки и применение электроприводов с пульсирующим законом движения.

На рис. 12 представлена фотография экспериментальной установки.



Рис. 12. Экспериментальная установка

На рис. 13 представлена блок-схема устройства для управления двухфазным АД в режиме пульсирующего движения, реализующая фазовый способ возбуждения пульсирующего режима работы АД, за счет питания одной из его обмоток постоянным напряжением.

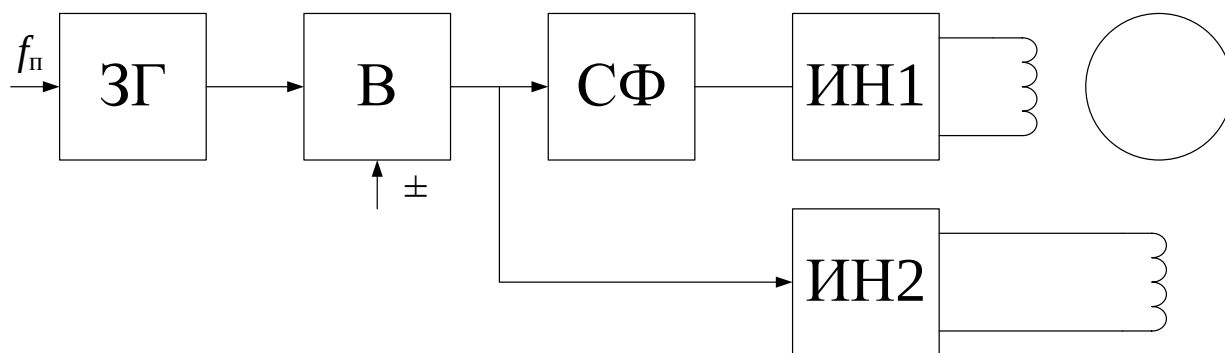


Рис. 13. Блок схема устройства для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме пульсирующего движения. Патент РФ 130157

На рис. 14 представлена блок-схема другого устройства для управления двухфазным АД в режиме пульсирующего движения. Данное устройство, в отличие от представленного выше, позволяет стабилизировать амплитуду пульсаций на постоянном уровне при регулировании частоты выходных пульсаций.

На рис. 15 представлены осциллограммы закона движения, скорости и углового ускорения подвижного элемента при фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений, полученные при помощи экспериментальной установки.

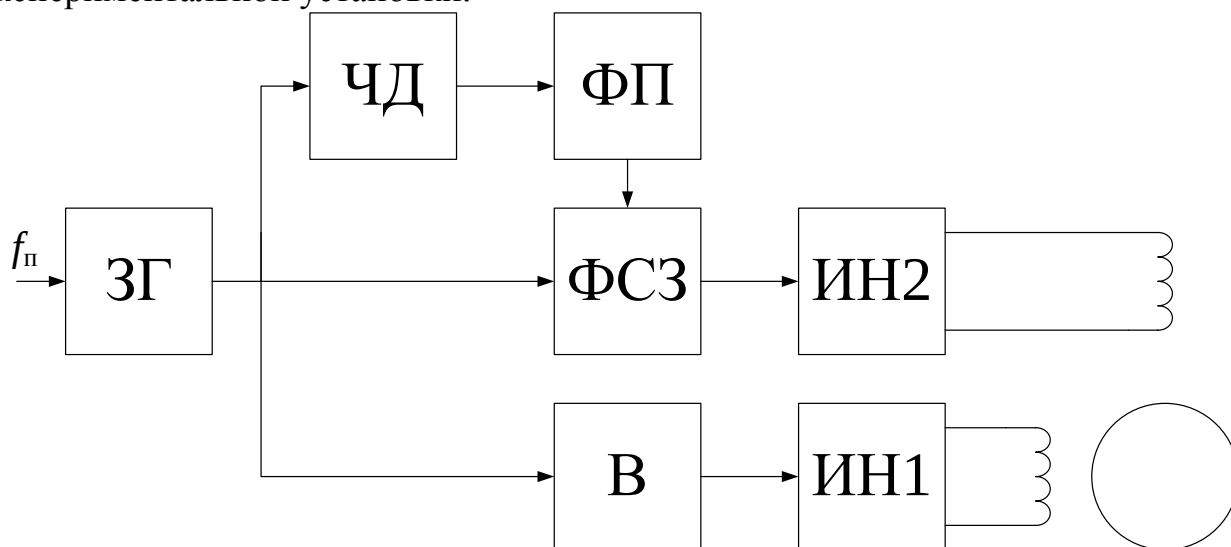


Рис. 14. Блок схема устройства для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме пульсирующего движения. Патент РФ 133990

На рис. 16а представлены осциллограммы выходного напряжения преобразователя при резком увеличении нагрузки с 2 до 10 А. Провал напряжения нагрузки возникает из-за инерционности элементов фильтра, так как ток дросселя не может быть мгновенно увеличен. При восстановлении напряжения возникает перерегулирование, после которого переходный процесс заканчивается.

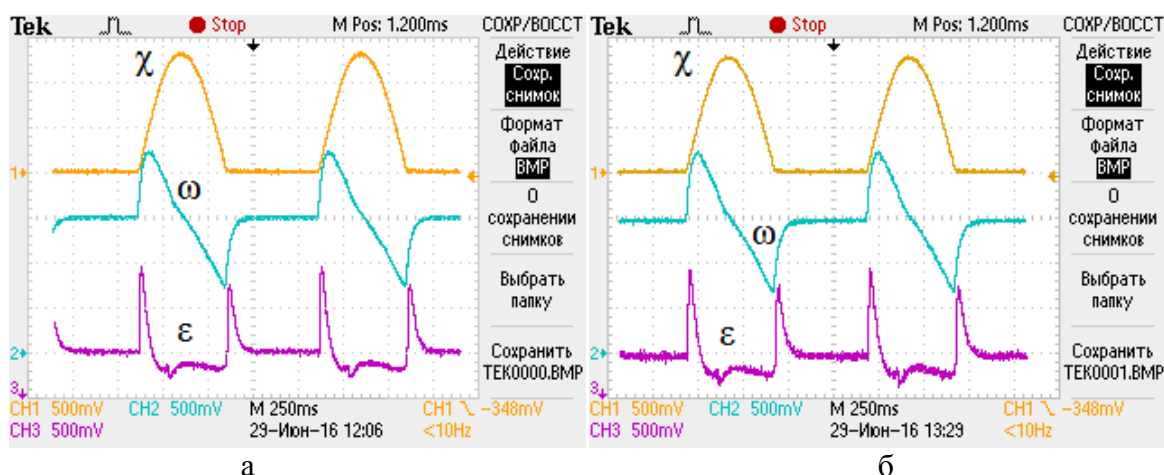


Рис. 15. Осциллограммы перемещения χ , скорости ω и ускорения ε АД при фазовой модуляции питающих напряжений

На рис. 16б представлена осциллограмма выходного напряжения преобразователя при резком снижении нагрузки с 10 до 2 А. При сбросе нагрузки возникает бросок напряжения, связанный с тем, что накопленная в дросселе фильтра энергия остаётся невостребованной нагрузкой и используется для заряда конденсатора. Переходный процесс, так же как и в случае увеличения нагрузки заканчивается, когда избыток энергии фильтра будет израсходован нагрузкой.



Рис. 16. Выходное напряжение ПН при резком: а – увеличении (набросе) нагрузки с 2 до 10 А ($U_{\text{вх}} = 32$ В); б – при резком уменьшении (сбросе) нагрузки с 10 до 2 А ($U_{\text{вх}} = 32$ В)

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. Установлены неизвестные ранее аналитические зависимости между выходными параметрами электрической машины, источников питания и его нагрузкой при фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений.
2. Разработана методика определения выходных параметров электропривода с пульсирующим законом движения и его энергетических

характеристик при потенциальной фазовой и амплитудной модуляции с учетом параметров нагрузки, двигателя и источников питания.

3. Разработан преобразователь напряжения для питания электропривода с пульсирующим законом движения и его математическая модель с цифровой системой управления, позволяющие отрабатывать алгоритмы управления, используя один и тот же исходный код.

4. Разработаны алгоритмы управления преобразователем напряжения по балансу необходимой и накопленной в системе энергии, позволяющие минимизировать до 20 % переходные процессы в типовых динамических режимах.

5. Установлено, что увеличение значения индуктивности дросселя или уменьшение величины ёмкости конденсатора на 25 % приводит к увеличению длительности переходного процесса на 50 %, а уменьшение индуктивности дросселя или увеличение ёмкости конденсатора на 50 % приводит к возникновению перерегулирования и, как следствие, к увеличению длительности переходного процесса в два раза.

6. Разработана математическая модель, позволяющая исследовать выходные характеристики электропривода с пульсирующим законом движения.

7. Установлено, что: в режиме питания одной из обмоток АД от источника постоянного тока в электромагнитном моменте АД отсутствуют высокочастотные составляющие двойной частоты питающей сети, присутствующие при питании обмоток АД переменным током.

8. Установлено, что введение позиционной составляющей в нагрузку электропривода пульсирующего движения приводит к потере им статической устойчивости и переходу к работе в режиме колебательного движения.

9. Установлено, что КПД электропривода пульсирующего движения (во всех рассмотренных стационарных режимах) можно увеличить на 50%, отключив на время покоя обе обмотки от источников тока.

10. Разработана экспериментальная установка электропривода с пульсирующим законом движения, позволяющая проверить адекватность результатов теоретического анализа, методик расчета и математического моделирования, а также проводить самостоятельные исследования.

11. Найдены и предложены способы расширения эксплуатационных возможностей двухфазных асинхронных двигателей за счёт работы их непосредственно в режиме пульсирующего движения, защищённые патентами на полезные модели.

Основные результаты, опубликованные в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Нагорный В. О. Управление двухфазным асинхронным двигателем в оптико-механических системах со сканированием / В. О. Нагорный, А. В. Аристов, // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2013. – № 2 (28). – С. 60–63.

2. Нагорный В. О. Асинхронный электропривод антенны радиолокатора секторного обзора в режиме пульсирующего движения / В. О. Нагорный, А. В. Аристов // Вестник СибГАУ. – 2015. – Т. 16. – № 1. – С. 97–103.
3. Nagorniy V. O. Voltage converter with the controlled energy balance for the electric drive with the pulsation motion mode / V. O. Nagorniy, A. V. Aristov, A. M. Gavrilov // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on. – 2015.

Материалы конференций и сборники статей:

4. Нагорный В. О. Управление импульсным преобразователем напряжения по балансу необходимой и накопленной в системе энергии / В. О. Нагорный, А. Ф. Лекарев, А. В. Аристов // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII междунар. науч.-техн. конф. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – С. 192–196.
5. Нагорный В. О. Использование математической модели импульсного преобразователя напряжения для отработки алгоритмов управления / В. О. Нагорный, А. В. Аристов, А. М. Гаврилов // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII междунар. науч.-техн. конф. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. – С. 201–206.
6. Нагорный В. О. Асинхронный электропривод антенны радиолокатора секторного обзора в режиме пульсирующего движения / В. О. Нагорный, А. В. Аристов // Решетнёвские чтения : материалы VII междунар. науч.-техн. конф. – Красноярск, 2014. – Т. 1. – С. 196–198.

Патенты и авторские свидетельства:

7. Пат. 130157 Российская Федерация. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме пульсирующего движения. / Аристов А. В., Нагорный В. О. МПК H02K, H02P ; заявл. 25.01.2013 ; опубл. 10.07.2013.
8. Пат. 133990 Российская Федерация. Устройство для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме пульсирующего движения. / Аристов А. В., Нагорный В. О. МПК H02P ; заявл. 30.05.2013 ; опубл. 27.10.2013.

Личный вклад автора

Вклад автора состоит в следующем: определение аналитических выражений для токов фаз АД пульсирующего движения при потенциальной фазовой и амплитудной модуляции [2, 6] (90 %). Нахождение аналитических выражений закона движения пульсирующего электропривода при потенциальном питании [1, 2, 6–8] (80 %). Разработка структурных схем для электроприводов с пульсирующим законом движения [1, 6–8] (30 %), разработка алгоритмов управления импульсным преобразователем напряжения для электропривода периодического движения [3 – 5] (95 %), разработка математической модели импульсного преобразователя напряжения, для отладки алгоритмов управления [3, 5] (95 %).