

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический
университет»**

Акционерное общество «Научно-производственный центр «Полюс»

На правах рукописи

Нагорный Василий Олегович

АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Аристов Анатолий Владимирович**

Томск – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| I. Современное состояние развития электроприводов с пульсирующим законом движения | 9 |
| 1.1. Анализ требований, предъявляемых технологическими процессами к электроприводам периодического движения..... | 9 |
| 1.2. Современное состояние вопроса в области оценки энергетических характеристик электропривода периодического движения | 13 |
| 1.2.1. Фазовый способ возбуждения пульсирующего режима движения асинхронного двигателя | 14 |
| 1.2.2. Амплитудный способ возбуждения пульсирующего режима движения асинхронного двигателя | 19 |
| 1.2.3. Критериальные оценки эффективности работы электропривода с пульсирующим законом движения | 21 |
| 1.3. Выводы | 26 |
| II. Основные рабочие и энергетические соотношения электропривода с пульсирующим законом движения при потенциальном питании АД..... | 27 |
| 2.1. Математическое описание электродвигателя с пульсирующим законом движения при потенциальном питании | 27 |
| 2.1.1. Потенциальная линейно-фазовая модуляция..... | 29 |
| 2.1.2. Потенциальная балансно-амплитудная модуляция..... | 45 |
| 2.2. Энергетические соотношения в асинхронном двигателе при потенциальных видах модуляции..... | 59 |
| 2.3. Выводы | 67 |
| III. Разработка преобразователей напряжения для электропривода с пульсирующим законом движения с улучшенными динамическими характеристиками..... | 68 |
| 3.1. Способы управления преобразователем напряжения | 68 |
| 3.2. Математическое описание преобразователя напряжения | 74 |
| 3.3. Динамические характеристики преобразователя напряжения..... | 77 |

| | |
|---|-----|
| 3.4. Выводы | 85 |
| IV. Математическое моделирование электропривода периодического движения | 86 |
| 4.1. Моделирование импульсного преобразователя напряжения | 89 |
| 4.2. Моделирование электромеханической части привода..... | 91 |
| 4.3. Результаты математического моделирования..... | 93 |
| 4.4. Анализ энергетических характеристик при потенциальных видах модуляции | 95 |
| 4.5. Выводы | 108 |
| V. Экспериментальные исследования и результаты внедрения электропривода периодического движения | 109 |
| 5.1. Описание экспериментальной установки..... | 109 |
| 5.2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ..... | 114 |
| 5.3. Практические разработки и применение электроприводов с пульсирующим законом движения | 123 |
| 5.4. Выводы | 130 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 131 |
| ЛИТЕРАТУРА | 133 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1 | 145 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2 | 149 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3 | 154 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4 | 157 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 5 | 159 |

ВВЕДЕНИЕ

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 систем 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»,

АО «НПЦ «Полюс» 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. Основное 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.

I. Современное состояние развития электроприводов с пульсирующим законом движения

1.1. Анализ требований, предъявляемых технологическими процессами к электроприводам периодического движения

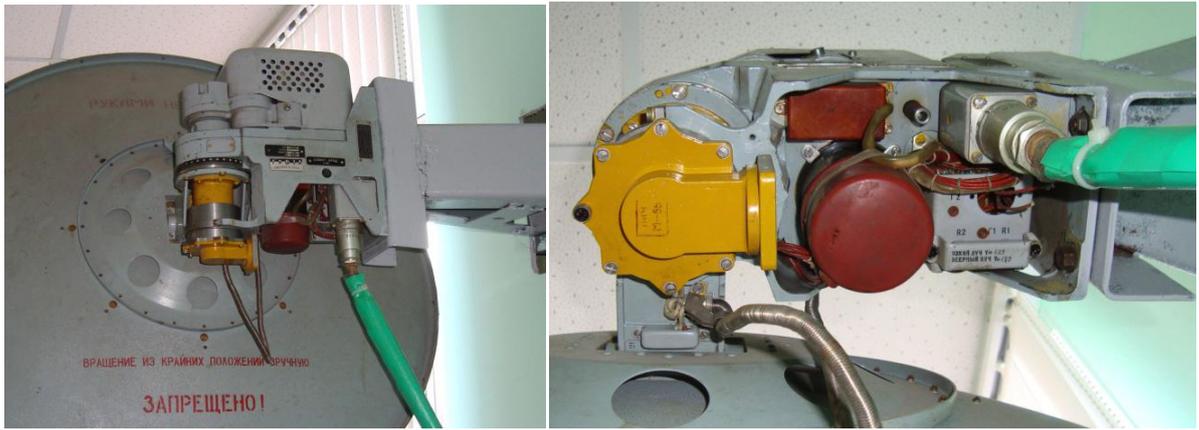
Одной из основных тенденций развития современного электропривода является слияние электрической машины и рабочих органов; вытеснение кинематических связей и механических звеньев электрическими [57]. Подобное построение привода улучшает массогабаритные показатели, увеличивает надёжность электропривода и удешевляет его.

Во многих отраслях народного хозяйства используются привода, совершающие возвратно-поступательное, возвратно-вращательное колебательное, пульсирующее или прерывистое движение [30, 38-40, 57, 59, 61-63, 69, 70, 84-86, 88, 93, 98, 101, 103, 108, 111-113].

Так, электропривода с периодическим законом движения (таблица 1) используется в авиационной, космической технике, в медицине, машиностроении, в горной и химической промышленности, а так же в технике контроля, измерения и управления [42, 68, 80, 86, 87, 104].

В авиационной и космической технике периодическое движение широко используется в электроприводах антенн радиолокационных станций (РЛС) секторного обзора [1, 65, 95], а также в приводе зеркал оптико-локационных станций (ОЛС) [102, 106, 107], где требуется обеспечить точность позиционирования 10^{-4} м при частоте сканирования 0,1 – 5 Гц.

На рис. 1.1 представлены фотографии антенного блока РЛС «Гроза». На фотографиях показан отражатель антенны с приводами угла места и азимута вид сбоку (рис. 1.1а) и снизу (рис. 1.1б), а так же установленный на самолёте, под носовым обтекателем, антенный блок (рис. 1.1в). Здесь периодическое движение используется в приводе азимута отражателя антенны. Для получения периодического движения отражателя по углу азимута используется двигатель постоянного тока и специальный редуктор.



а

б



в

Рис. 1.1. Антенный блок РЛС «Гроза»
а – вид сбоку; б – вид снизу; в – общий вид антенного блока РЛС «Гроза -26»,
установленного на самолёте Ан-26

На рис. 1.2 представлена фотография оптико-локационной станции ОЛС-27. Сквозь стекло блистера хорошо видно зеркало прицельной системы.

Положение зеркала определяется приводами угла места и азимута, управляемыми бортовой цифровой вычислительной системой. В режиме сканирования электропривод зеркала, также, работает в периодическом режиме [102].



Рис. 1.2. Оптико-локационная станция ОЛС-27 на самолёте Су-27УБ. Сквозь стекло блистера видно зеркало прицельной системы

В горной и химической промышленности периодическое движение используется для очистки, сушки, перемешивания сыпучих веществ и жидкостей [43-56, 79, 96, 100]. Требуемая частота 3 – 100 Гц, амплитуда 2 – 90 град, мощность до 5 кВт.

Например, в химической промышленности вибрационное воздействие на перемешиваемые материалы через рабочие органы смесителя увеличивает производительность процесса, снижает энергопотребление и улучшает качество получившейся смеси. При этом в одних случаях вибрация может интенсифицировать процесс, а в других вызывать специфические эффекты, используемые для улучшения перемешивания компонентов [60, 105].

В медицине периодическое движение применяется в приводах искусственных органов [97], где требуется обеспечить ресурс не менее 10 лет, низкое энергопотребление, малые массу и габариты.

Периодическое движение используется так же в технике контроля и измерения в измерителях люфтов, оптико-механических сканаторах [34]. Здесь требуются частоты порядка 0,1 – 50 Гц и мощности 1 – 800 Вт.

У современного электропривода должна быть возможность не только плавно регулировать амплитуду, частоту и фазу выходных параметров, но и реализовывать разные законы движения. Однако не все электропривода, описанные выше, отвечают предъявляемым к ним требованиям.

Требования, предъявляемые технологическими процессами к электроприводам периодического движения, представлены в табл. 1.1.

Области применения электроприводов периодического движения

Таблица 1.1

| Область применения | Технологические операции | Примечание |
|--|--|--|
| Машиностроение | Виброточение Нарезание резьб Вибросварка Литьё в формы Перемешивание Виброфрезерование | Частота $10^{-2} - 10^4$ Гц Амплитуда $10^{-4} - 180$ град Мощность 0,5 – 50 кВт |
| Химическая промышленность | Перемешивание Виброочистка газов Виброизмельчение Вибросушка | Частота 3 – 100 Гц Амплитуда 0,2 – 90 град Мощность 0,1 – 5 кВт |
| Текстильная промышленность | Привод челноков Раскладка нити при намотке | Частота 0,1 – 50 Гц Амплитуда 10 – 600 град Мощность 0,05 – 0,85 кВт |
| Техника измерения, контроля и управления | Оптико-механическое сканирование Фотоэлектроколориметрирование Измерение и управление Измерение люфтов | Частота 0,1 – 10 Гц Амплитуда 0,1 – 10^4 град Мощность $10^{-3} - 0,8$ кВт |
| Медицина | Привод искусственных органов | Частота 0,8 – 3 Гц |
| Фармацевтика | Блистеровка | Мощность 10 – 200 Вт |
| Авиация и космонавтика | Привод антенн РЛС и зеркал ОЛС | Частота 0,1 – 5 Гц Точность 10^{-4} м |
| Бытовая техника | Холодильники Игрушки Реклама Вибропривод | Частота 0,1 – 100 Гц Амплитуда 1 – 1000 град Мощность $10^{-4} - 1$ кВт |
| Испытательная техника | Моделирование ударных нагрузок Моделирование вибронагрузок Силовое возбуждение Вибропрочность Виброустойчивость Качание по частоте Калибровочное | Частота 0,1 – 10^3 Гц Амплитуда $10^{-3} - 60$ град Мощность 0,05 – 46 кВт |

1.2. Современное состояние вопроса в области оценки энергетических характеристик электропривода периодического движения

Отличительной чертой энергетических процессов, происходящих в электроприводе пульсирующего движения, является их квазипереходной характер. Даже в установившемся режиме работы в электрической машине происходит изменение электромагнитных характеристик в соответствии с модуляцией питающих напряжений. Также меняются и энергетические характеристики электропривода пульсирующего движения. Это связано, в первую очередь, с периодическим переходом электрической машины из двигательного режима в генераторный, а затем в режим электромагнитного тормоза. Чередование двигательного, генераторного, тормозного режимов и режима покоя в течение периода приводит к значительным изменениям активных и реактивных мощностей, участвующих в энергетическом обмене между электрической машиной и сетью.

В связи с этим большой интерес представляют исследования процессов энергетического обмена, протекающих в исполнительном двигателе, определение длительности двигательного, генераторного и тормозного режимов работы и поиск путей улучшения энергетических характеристик привода в целом.

Аналитическое выражение угловой скорости поля ω_0 можно найти путём дифференцирования результирующего вектора потокосцепления $\bar{\Psi}_0$ электрической машины в воздушном зазоре [109]. В общем случае будем рассматривать качающееся магнитное поле, состоящим из двух пульсирующих потокосцеплений $\Psi_{\alpha s}$, $\Psi_{\beta s}$ смещённых на угол 90 град. в пространстве. Математическое описание последних зависит от способа возбуждения пульсирующего режима работы и определяется функциями регулирования источников питания, подключённых к обмоткам двухфазного обобщённого электромеханического преобразователя [89]. Тогда, закон движения и скорость электромагнитного поля статора АД может быть найдены как:

$$\chi_0 = \text{Arg}(\bar{\Psi}_0) = \text{Arctg} \frac{\Psi_{\beta s}}{\Psi_{\alpha s}},$$

$$\omega_0 = \frac{d\chi_0}{dt} = \frac{\Psi'_{\beta s} \Psi_{\alpha s} - \Psi_{\beta s} \Psi'_{\alpha s}}{\Psi_{\alpha s}^2 + \Psi_{\beta s}^2}. \quad (1.1)$$

Используя выражения (1.1) проведём оценку энергетического обмена в электроприводе пульсирующего движения для двух видов потенциальной модуляции: при фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений.

1.2.1. Фазовый способ возбуждения пульсирующего режима движения асинхронного двигателя

При фазовом способе возбуждения пульсирующего режима работы пульсирующее электромагнитное поле возникает в воздушном зазоре обобщённого электрического двигателя, если хотя бы одно из фазных потокосцеплений является периодической временной функцией несущей частоты ω_1 , линейно модулированной по фазе сигналом частоты Ω . При линейной фазовой модуляции обмотки β можно записать:

$$\psi_{\alpha s} = \psi_{m1} \sin(\omega_1 t + \beta) \cdot A(t);$$

$$\psi_{\beta s} = \psi_{m2} \sin((\omega_1 t + \beta) + (\Omega t + \alpha)),$$

где

$$A(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)\Omega t)}{2k-1};$$

ψ_{m1}, ψ_{m2} – амплитуды фазных потокосцеплений электрической машины; α, β – начальные фазы потокосцеплений или

$$\psi_{\alpha s} = \psi_{m1} \sin(\omega_1 t + \beta) \cdot A(t);$$

$$\psi_{\beta s} = \psi_{m2} \sin(\omega_2 t + \gamma), \quad (1.2)$$

где $\omega_2 = \omega_1 + \Omega$; $\gamma = \alpha + \beta$

Выражения (1.2) используются для случая разночастотного питания фазных обмоток электрической машины с прерыванием одного из потокосцеплений, в моменты времени, когда электромагнитный момент

переходит через ноль. Скорость движения поля в воздушном зазоре электрической машины можно определить следующим образом:

$$\omega_0 = \frac{\Psi_{m1}\Psi_{m2}}{\Psi_{m1}^2 \sin^2(\omega_1 t + \beta) A^2(t) + \Psi_{m2}^2 \sin^2(\omega_2 t + \gamma)} \cdot \left(\frac{\Omega}{2} \sin((\omega_1 + \omega_2)t + \beta + \gamma) - \frac{(\omega_1 + \omega_2)}{2} \sin(\Omega t + \alpha) \right) \cdot A(t) \quad (1.3)$$

Из выражения (1.3) видно, что скорость поля, помимо частоты Ω , содержит ещё и пульсации суммарной частоты питания $\omega_1 + \omega_2$, причём их амплитуда сильно зависит от соотношения амплитуд фазных потокосцеплений Ψ_{m1} , Ψ_{m2} (рис. 1.3). Пики скорости соответствуют резкому уменьшению магнитного потока в машине ($\psi_0 \rightarrow 0$) [108].

Среднее значение скорости поля за полупериод частоты пульсации

$$\omega_{0\text{ср}} = \frac{\Omega}{\pi} \int_{t_0}^{t_0 + \frac{\pi}{\Omega}} \omega_0(t) dt$$

зависит от соотношения частот ω / Ω , начальных сдвигов β и γ фаз соотношения амплитуд Ψ_{m1} / Ψ_{m2} потокосцеплений.

При оценке закона движения на низких частотах, при соотношении $\omega / \Omega \gg 10$, влиянием высокочастотных составляющих можно пренебречь.

На рис. 1.4 представлены зависимости от времени абсолютного и относительного скольжений для случая фазовой модуляции МДС при $\omega_2 = 0,75 \omega_1$.

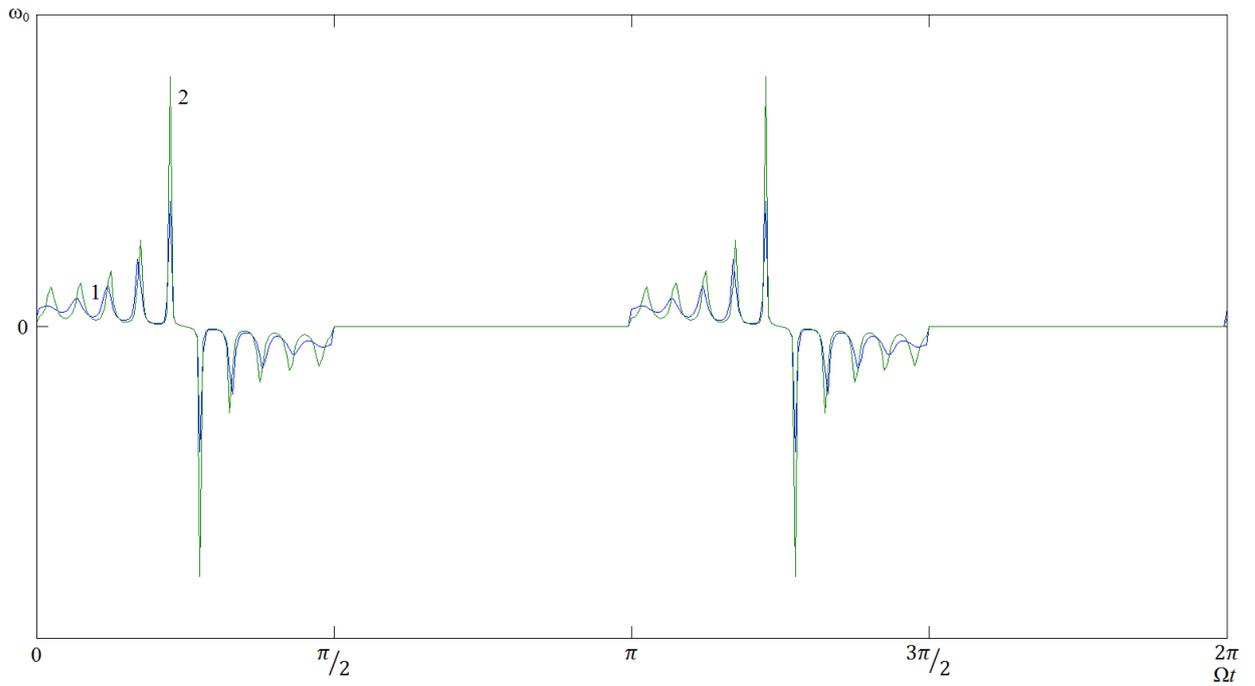


Рис. 1.3. Угловая скорость электромагнитного поля при линейной фазовой модуляции МДС: $\omega_2 = 0,9 \omega_1$, $\alpha_0 = 1$ (1), $\alpha_0 = 0,5$ (2) при $\gamma = 0$

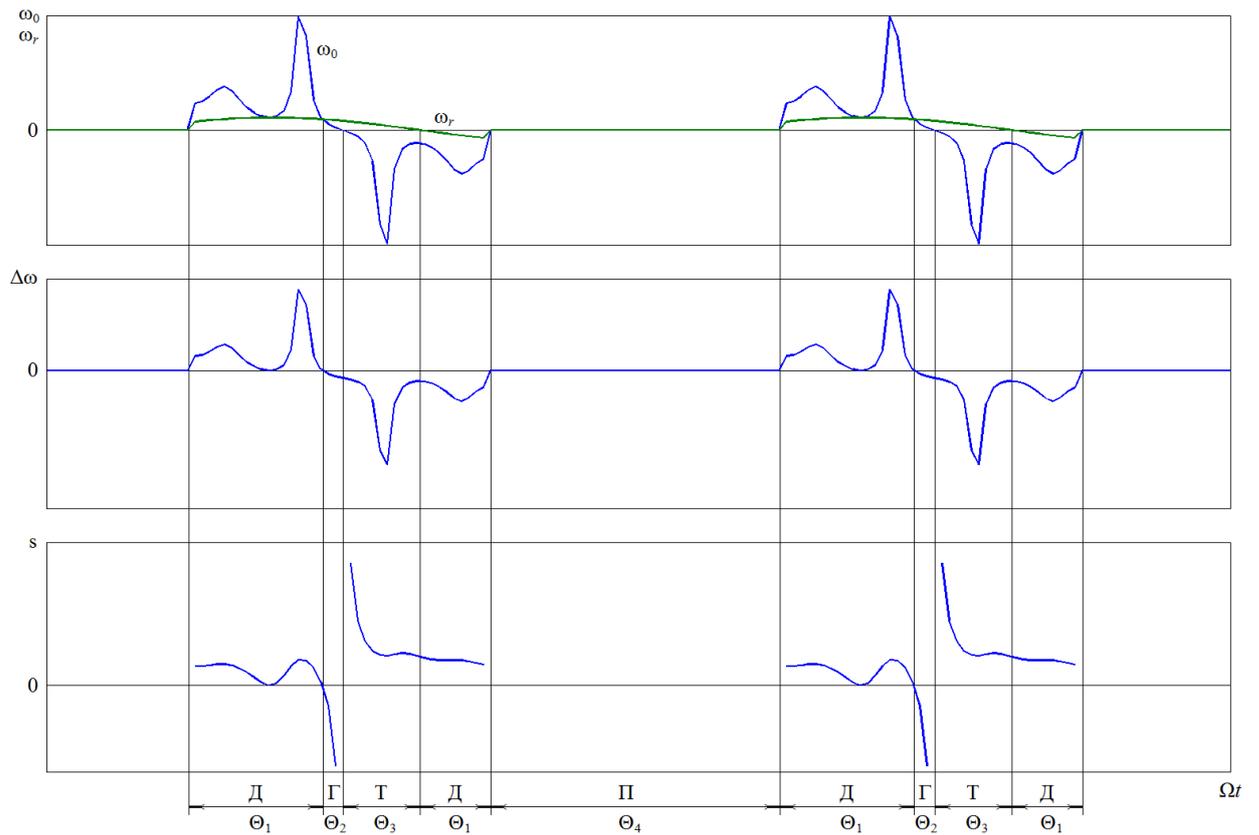


Рис. 1.4. Временные зависимости скоростей пульсаций электромагнитного поля (ω_0), подвижного элемента электродвигателя (ω), абсолютного ($\Delta\omega$) и относительного (s) скольжений при фазовой модуляции МДС: $\omega_2 = 0,75 \omega_1$, $\alpha_0 = 1$

Временная зависимость относительного скольжения имеет три характерных участка:

$\infty \geq s > 0$ – режим электромагнитного тормоза (Т);

$1 \geq s \geq 0$ – двигательный режим (Д);

$0 > s \geq -\infty$ – генераторный режим (Г).

Таким образом, в течение одного периода электродвигатель работает в трёх режимах. Период повторения процессов энергетического обмена определяется порядком чередования режимов работы (Т), (Д), (Г) и равен полупериоду пульсаций.

В двигательном режиме электрическая машина потребляет из сети активную мощность и передаёт в нагрузку энергию, необходимую для её разгона до амплитудного значения скорости ω_{rm} . При этом происходит накопление энергии в инерционной составляющей нагрузки. В генераторном и тормозном режимах происходит компенсация запасённой в нагрузке энергии для возврата электромеханической системы в исходное состояние [108]. При разгоне в обратном направлении процессы повторяются.

Режим компенсации запасённой в нагрузке энергии можно разделить на две составляющие: с потреблением энергии из сети и с отдачей энергии в сеть. Этим составляющим соответствует генераторный режим и режим электромагнитного тормоза. С точки зрения энергетических показателей электропривода тормозной режим невыгоден, так как на компенсацию накопленной в нагрузке привода энергии в процессе торможения тратится энергия из сети, которая теряется в активных сопротивлениях машины. Для электропривода с пульсирующим законом движения более выгоден генераторный режим, осуществляющий рекуперативное торможение. Таким образом, улучшение энергетических характеристик электропривода с пульсирующим законом движения возможно за счёт увеличения длительности генераторного режима и уменьшения времени работы машины в режиме электромагнитного тормоза в течение полупериода пульсации с

целью возврата в сеть как можно большей части энергии запасённой в нагрузке при её разгоне в двигательном режиме.

На рис. 1.5 изображена векторная диаграмма скоростей пульсации поля и подвижного элемента.

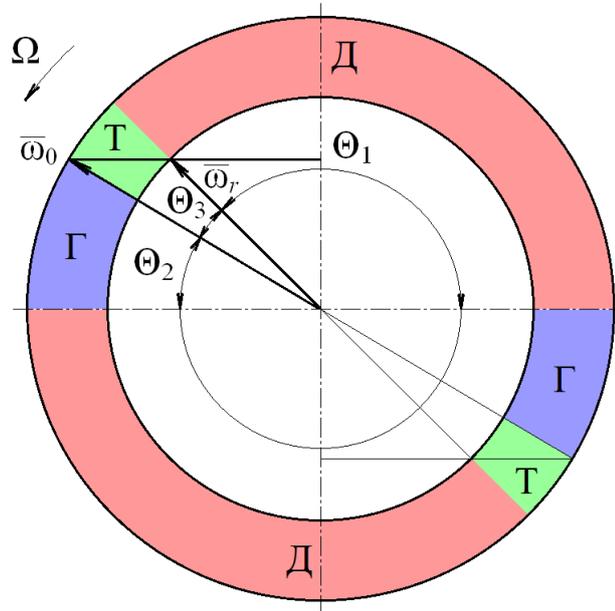


Рис. 1.5. Векторная диаграмма пульсаций поля $\bar{\omega}_0$ подвижного элемента $\bar{\omega}_r$: $\omega_0 = \omega_r$

Скорости пульсаций представлены на диаграмме векторами $\bar{\omega}_0$ и $\bar{\omega}_r$, вращающимися в направлении против часовой стрелки со скоростью Ω , проекции которых на вертикальную ось дают мгновенные значения угловых скоростей поля ω_0 и подвижного элемента ω_r соответственно. Углы Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 и Θ_4 характеризуют двигательный, генераторный, тормозной режимы и режим покоя соответственно. Длительности двигательного, генераторного, тормозного режимов, а также режима покоя можно определить согласно (1.4):

$$\begin{aligned}
 \Theta_1 &= t_1 \Omega - \text{двигательный интервал времени;} \\
 \Theta_2 &= t_2 \Omega - \text{генераторный интервал времени;} \\
 \Theta_3 &= t_3 \Omega - \text{тормозной интервал времени;} \\
 \Theta_4 &= t_4 \Omega - \text{интервал времени покоя.}
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Временной интервал генераторного режима:

$$t_2 = \frac{\arcsin\left(\frac{\omega_{0r}}{\omega_{rm}}\right) - \Theta_3}{\Omega},$$

где

$$\Delta\omega(t) = \omega_0(t) - \omega_r(t) = 0$$

Максимальное своё значение угол генераторного режима Θ_{2max} примет когда $\omega_0(t_0) = \omega_{rm}$. При этом

$$t_0 = \frac{\Theta_3 + \frac{\pi}{2}}{\Omega}, \quad \Theta_{2max} = \frac{\pi}{2} - \Theta_3.$$

1.2.2. Амплитудный способ возбуждения пульсирующего режима движения асинхронного двигателя

При амплитудном способе возбуждения пульсирующего режима работы пульсирующее магнитное поле возникает в воздушном зазоре обобщённого электрического двигателя, если хотя бы одно из фазных потокосцеплений является периодической временной функцией несущей частоты ω , балансно-модулированной по амплитуде сигналом скорости Ω . При синусоидальной балансной амплитудной модуляции обмотки β можно записать:

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha s} &= \psi_{m1} \sin(\omega_1 t + \alpha) \cos(\Omega t + \beta); \\ \psi_{\beta s} &= \psi_{m2} \cos(\omega_1 t + \alpha) \cdot A(t). \end{aligned}$$

Согласно (1.1) угловая скорость поля при амплитудной модуляции питающих напряжений определяется выражением

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{-\psi_{m1}\psi_{m2}}{\psi_{m1}^2 \sin^2(\omega_1 t + \alpha) \cos^2(\Omega t + \beta) + \psi_{m2}^2 \cos^2(\omega_1 t + \alpha)} \cdot \\ &\cdot \left(\omega_1 \cos(\Omega t + \beta) - \frac{\omega_1 + \Omega}{4} \cos((2\omega_1 - \Omega)t + 2\alpha - \beta) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{\omega_1 - \Omega}{4} \cos((2\omega_1 + \Omega)t + 2\alpha + \beta) \right) \cdot A(t). \end{aligned}$$

На рис. 1.6 представлены полупериоды скорости пульсаций поля для различных значений коэффициента α_0 , а на рис. 1.7 представлены

зависимости от времени абсолютного и относительного скольжений для случая амплитудной модуляции МДС при $\omega_2 = 0,75 \omega_1$, $\alpha_0 = 1$.

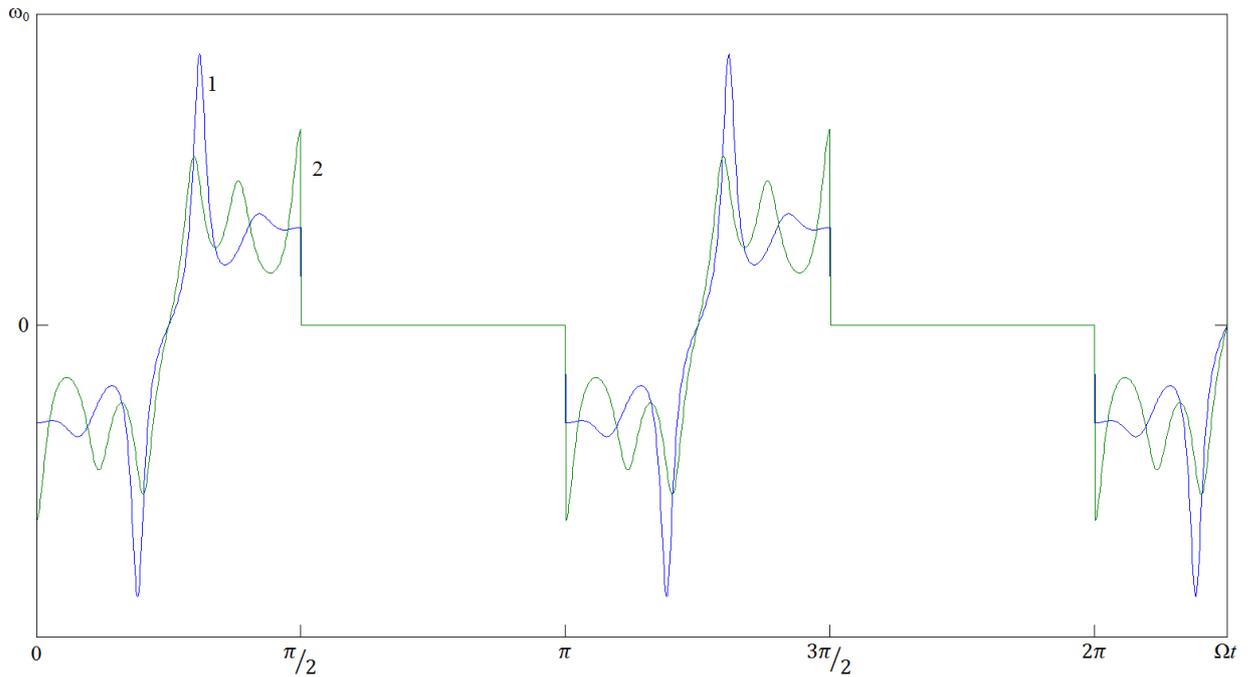


Рис. 1.6. Угловая скорость при линейной фазовой модуляции МДС: $\omega_2 = 0,9 \omega_1$, $\alpha_0 = 1$ (1), $\alpha_0 = 0,5$ (2) при $\gamma = 0$

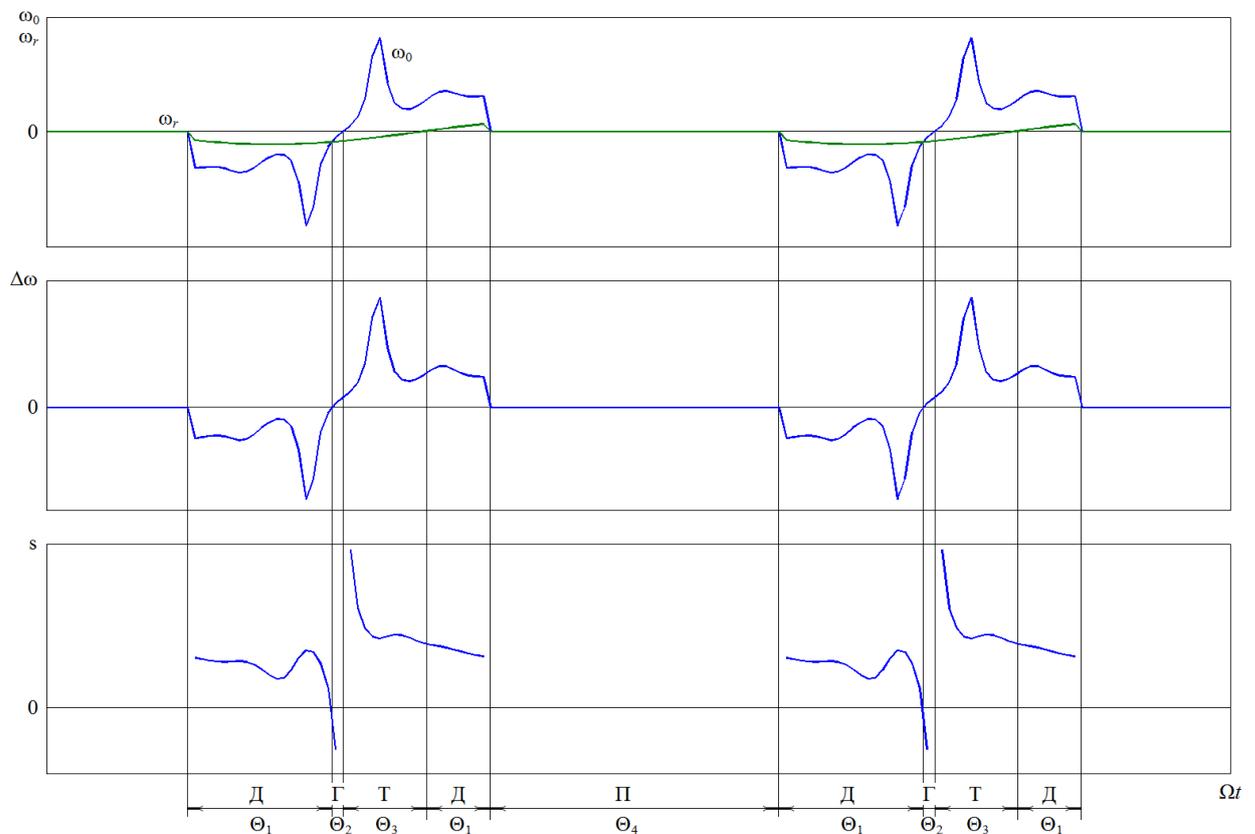


Рис. 1.7. Временные зависимости скоростей пульсаций поля (ω_0), подвижного элемента электродвигателя (ω), абсолютного ($\Delta\omega$) и относительного (s) скольжений при фазовой модуляции МДС: $\omega_2 = 0,75 \omega_1$, $\alpha_0 = 1$

Представленные на рис. 1.6, 1.7 графические зависимости идентичны аналогичным зависимостям для режима фазовой модуляции питающих напряжений (рис. 1.3, 1.4). Следовательно, процессы энергетического обмена при амплитудном и фазовом способе возбуждения пульсирующего режима работы в асинхронном двигателе идентичны. Так же как и фазовому способу, амплитудному характерны наличие двигательного, генераторного и тормозного режимов работы в одном цикле. Максимальный временной интервал генераторного режима наблюдается при

$$\Theta_{2max} = \frac{\pi}{2} - \Theta_3 .$$

Анализ процессов энергообмена в электроприводе пульсирующего движения показал, что:

– каждый цикл энергетического обмена состоит из четырёх режимов: двигательного, генераторного, тормозного и режима покоя;

– наличие трёх активных режимов в течении одного цикла пульсации говорит о разнонаправленности потоков энергии в электроприводе пульсирующего движения, которыми можно управлять, обеспечивая нужные показатели качества электромеханической системы с периодическим законом движения;

– одним из способов улучшения энергетических показателей электропривода пульсирующего движения является увеличение длительности генераторного режима работы двигателя.

1.2.3. Критериальные оценки эффективности работы электропривода с пульсирующим законом движения

Увеличение числа машин и механизмов, использующих периодическое, в частности пульсирующее движение и ужесточение требований к энергетическим, точностным и скоростным характеристикам уже имеющихся электроприводов периодического движения приводит к необходимости поиска новых методов оценки эффективности работы исполнительного

элемента электропривода периодического движения [1, 4-7, 30, 34, 38-40, 59, 62, 63, 65, 69, 84, 85, 88, 93, 95, 98, 101, 106-108, 111-113].

Критериальные оценки показателей качества электроприводов периодического движения можно условно разделить на две группы [108]. К первой группе относятся оценки качества процесса электромеханического преобразования энергии электропривода периодического движения. Вторая группа это критерии количественной оценки процесса электромеханического преобразования и эффективности работы электропривода с периодическим законом движения [32]. Известно, что при работе электромеханических преобразователей в динамических режимах, электропривод потребляет активную, и генерирует или потребляет реактивную мощность. Полная потребляемая из сети мощность характеризуется также мощностью искажения и мощностью не симметрии [92].

Для электрических машин, работающих в режиме пульсирующего движения, важно знать средние за период энергетические показатели. При этом за период в электромеханических системах, работающих в квазипереходном процессе целесообразно принять:

$$T = \frac{2\pi}{\Omega},$$

где Ω – частота пульсаций электромеханической системы в рад / с.

Коэффициент мощности (k_m), коэффициент сдвига (k_c), коэффициент искажения (k_i) и коэффициент не симметрии (k_n) характеризуют соотношения между активной и реактивной мощностями, а также мощностью не симметрии и мощностью искажения, что позволяет оценить качество потребления энергии электроприводом пульсирующего движения [32].

Средний за период коэффициент мощности

$$k_m = \frac{P_{cp}}{S_{cp}} = \frac{P_{cp}}{\sqrt{P_{cp}^2 + Q_{cp}^2 + T_{cp}^2}} = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{\sum_{k=1}^n U_k I_k},$$

где $P_{\text{ср}}$, $Q_{\text{ср}}$, $S_{\text{ср}}$, $T_{\text{ср}}$ – средние значения активной, реактивной, полной мощности и мощности искажения за период; P_k – активная мощность k -ой гармоники активной мощности; U_k , I_k – действующее значение k -ой гармоники напряжения и тока, соответственно. Коэффициент мощности может быть выражен через другие коэффициенты следующим образом

$$k_{\text{м}} = k_{\text{с}} k_{\text{и}} ,$$

где $k_{\text{с}}$ – коэффициент сдвига, $k_{\text{и}}$ – коэффициент искажения.

Коэффициент сдвига характеризует соотношение между активной и реактивной потребляемыми мощностями фазы

$$k_{\text{с}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ср}}^2}{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}} .$$

Коэффициент искажения определяет степень искажения потребляемого тока

$$k_{\text{и}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2}{P_{\text{ср}}^2 + Q_{\text{ср}}^2 + T_{\text{ср}}^2}} .$$

Среднюю (активную) мощность за период можно найти из выражения [76, 78]

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \sum_k^n P_k ,$$

где

$$P_k = \frac{1}{T} \int_0^T U_k i_k dt .$$

k – порядок гармоники.

Средняя за период реактивная мощность

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T Q dt .$$

Реактивная мощность расходуется при создании магнитных полей в электрической машине. Реактивная мощность при синусоидальном питании [108]

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^T U(t) d(i(t)) .$$

При несинусоидальном питании реактивную мощность можно представить как сумму реактивных мощностей отдельных гармоник

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin(\varphi_k) ,$$

где Q_k – реактивная мощность k -ой гармоники.

Средняя за период полная мощность

$$S_{\text{ср}} = \sum_{k=1}^n \sqrt{U_k^2 I_k^2} .$$

Обобщённый коэффициент полезного действия для электропривода пульсирующего движения определяется как отношение величины полной мощности на валу S_2 к активной составляющей потребляемой мощности P_1

$$\eta = \frac{S_2}{P_1} , \quad (1.5)$$

где

$$S_2 = \frac{1}{T} \int_0^T |P_2| dt = \frac{1}{T} \int_0^T |M_3 \omega| dt .$$

M_3 и ω – электромагнитный момент и угловая скорость ротора.

Зная средние значения КПД и коэффициента мощности в периодическом режиме работы можно определить геометрические размеры электрической машины, работающей в пульсирующем режиме, по методике [77].

В общем случае, в течение одного цикла работы электрической машины могут быть различные режимы работы: пуск, номинальный режим, торможение, реверс и т. д. В этом случае, если известны энергетические

показатели для каждого режима в отдельности, средние энергетические показатели можно определить следующим образом [76].

Среднее значение КПД:

$$\eta_P = \frac{\sum_{k=1}^n \eta_k t_k}{\sum_{k=1}^n t_k},$$

где η_k , t_k – КПД и длительность k -го режима работы.

Среднее значение коэффициент мощности:

$$k_M = \frac{\sum_{k=1}^n k_{Mk} t_k}{\sum_{k=1}^n t_k},$$

где k_{Mk} – коэффициент мощности k -го режима работы.

Иногда КПД удобней представить не как отношение мощностей (1.5), а как отношение работ

$$\eta_W = \frac{W_2}{W_1}, \quad (1.6)$$

где W_1 , W_2 – потреблённая из сети энергия и полезная работа соответственно.

Соотношение (1.6) удобно использовать, если работа над объектом совершается не одновременно с работой производимой объектом или совершается с иной скоростью [108] (работа на позиционную нагрузку) [81]. Работа на позиционную нагрузку характерна для электроприводов колебательного движения и невозможна для электроприводов с пульсирующим законом движения. Здесь также стоит отметить, что в общем случае КПД по мощности (η_P) и КПД по энергии (η_W) не эквивалентны. Совпадение же происходит в том случае, когда продолжительность подвода и выделения энергии одинакова.

Таким образом, учитывая специфику работы электропривода с пульсирующим законом движения, основной критериальной оценкой эффективности будем считать коэффициент полезного действия (1.5).

1.3. Выводы

Из проведённого анализа можно сделать следующие выводы:

1. В настоящее время растёт потребность в электроприводах пульсирующего движения, а увеличивающиеся мощности этих электроприводов требуют улучшения энергетических характеристик;
2. В электроприводе пульсирующего движения электрическая машина в течение полупериода частоты пульсации работает в двигательном, генераторном режимах, а также в режиме электромагнитного тормоза, что обуславливает неоднонаправленность потока энергии, которыми можно управлять в соответствии с требованиями технологического процесса.
3. Основной критериальной оценкой эффективности работы электропривода с пульсирующим законом движения следует считать обобщенный коэффициент полезного действия в течение одного периода или цикла работы электрической машины.

II. Основные рабочие и энергетические соотношения электропривода с пульсирующим законом движения при потенциальном питании АД

В настоящем разделе разрабатываются теоретические основы для синтеза и анализа электроприводов пульсирующего движения при потенциальном питании.

2.1. Математическое описание электродвигателя с пульсирующим законом движения при потенциальном питании

При исследовании периодических режимов удобно представить электрическую машину в виде некой идеализированной обобщённой модели с двумя парами взаимоперпендикулярных обмоток: на первичном и вторичном элементах [75], что позволяет при определённых допущениях проанализировать наибольшее число различных типов АД, работающих в режиме пульсирующего движения.

Для данной модели возможны несколько вариантов записи системы описывающих её дифференциальных уравнений. Наиболее просто анализируются уравнения, записанные в координатных осях α , β или d , q , жёстко связанных со статором или ротором соответственно. Так, например, приведение к осям α , β 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) [64] модель обобщённого электродвигателя, работающего в режиме пульсирующего движения в системе координат α , β описывается следующей системой дифференциальных уравнений –

$$\left. \begin{aligned}
 U_{\alpha s}(t) &= i_{\alpha s} R_{\alpha s} + L_{\alpha s} \frac{di_{\alpha s}}{dt} + M_{\alpha} \frac{di_{\alpha r}}{dt} ; \\
 U_{\beta s}(t) &= i_{\beta s} R_{\beta s} + L_{\beta s} \frac{di_{\beta s}}{dt} + M_{\beta} \frac{di_{\beta r}}{dt} ; \\
 0 &= i_{\alpha r} R_r + L_r \frac{di_{\alpha r}}{dt} + M_{\alpha} \frac{di_{\alpha s}}{dt} - \omega (M_{\beta} i_{\beta s} + L_r i_{\beta r}) ; \\
 0 &= i_{\beta r} R_r + L_r \frac{di_{\beta r}}{dt} + M_{\beta} \frac{di_{\beta s}}{dt} + \omega (M_{\alpha} i_{\alpha s} + L_r i_{\alpha r}) ; \\
 M_{\text{эм}} &= k_{\text{д}} (M_{\alpha} i_{\alpha s} i_{\beta r} - M_{\beta} i_{\beta s} i_{\alpha r}) = M_{\text{н}} \left(\int \omega dt, \omega, \frac{d\omega}{dt} \right) ,
 \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

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;

$M_{\text{эм}}$, $M_{\text{н}}$ – обобщённое электромагнитное усилие и нагрузка;

$k_{\text{д}}$ – обобщённый силовой коэффициент.

Для угловых движений $k_{\text{д}} = 1$, а для прямолинейных $k_{\text{д}} = \pi^2 / \tau^2$; где τ – полюсное 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 [37].

Так, при потенциальном питании АД можно считать в системе уравнений (2.1) заданными фазные напряжения и неизвестными фазные токи и закон движения подвижного элемента двигателя, а при токовом питании – фазные токи и, соответственно, фазные напряжения и развиваемое двигателем электромагнитное усилие.

Очевидно, что система (2.1) является системой дифференциальных уравнений с нелинейными коэффициентами, точное аналитическое решение которой найти невозможно. Однако, если частота пульсаций вала исполнительного двигателя Ω не менее чем на порядок меньше циклической

частоты питающей сети ω_c ($\Omega \ll \omega_c$), то можно считать в первых четырёх уравнениях системы $\omega = \text{const}$ [62]. При этом уравнения становятся линейными.

2.1.1. Потенциальная линейно-фазовая модуляция

Для определения энергетических характеристик электропривода согласно [32], необходимо определить закон движения его подвижного элемента и электромагнитный момент.

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

$$\begin{aligned} U_{\alpha s}(t) &= U_{m1} \cos(\omega_1 t) \cdot A(t); \\ U_{\beta s}(t) &= U_{m2} \sin(\omega_2 t + \gamma), \end{aligned} \quad (2.2)$$

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 ; $A(t)$ – определяется выражением

$$A(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)\Omega t)}{2k-1}.$$

Здесь $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ – характеризует частоту пульсаций закона движения подвижного элемента двигателя.

Операторные изображения питающих напряжений запишутся как:

$$\begin{aligned} U_{\alpha s}(p) &= U_{m1} \left(\frac{p}{2(p^2 + \omega_1^2)} + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\frac{(2k-1)\Omega - \omega_1}{(p^2 + ((2k-1)\Omega - \omega_1)^2)} + \frac{(2k-1)\Omega + \omega_1}{(p^2 + ((2k-1)\Omega + \omega_1)^2)}}{(2k-1)} \right); \\ U_{\beta s}(p) &= U_{m2} \frac{\omega_2 \cos \gamma + p \sin \gamma}{p^2 + \omega_2^2}. \end{aligned}$$

Определим корни полиномов $U_{\alpha s}(p)$ и $U_{\beta s}(p)$ и их первых производных (табл. 2.1).

Таблица 2.1

| № | Корни знаменателей питающих напряжений | Производные знаменателей питающих напряжений |
|---|--|--|
| 1 | $p = \pm j\omega_1$ | $4p$ |
| 2 | $p_k = \pm j((2k - 1)\Omega - \omega_1)$ | $2(2k - 1)p$ |
| 3 | $p_k = \pm j((2k - 1)\Omega + \omega_1)$ | $2(2k - 1)p$ |
| 4 | $p = \pm j\omega_2$ | $2p$ |

аналитическое решение для токов в установившемся режиме работы можно найти, применяя теорему разложения [66]:

$$\begin{aligned}
 i_n &= \sum_{l=1}^4 \sum_{h=1}^m \frac{q_l(p_h) a_{ln}(p_h) e^{p_h t}}{Q_l'(p_h) \det(A(p_h)) + Q_l(p_h) \det'(A(p_h))} = \\
 &= \frac{q_1(p_1) a_{1n}(p_1) e^{p_1 t}}{Q_1'(p_1) \det(A(p_1))} + []^* + \frac{q_1(p_{2k}) a_{1n} e^{p_{2k} t}}{Q_1'(p_{2k}) \det(A(p_{2k}))} + []^* + \\
 &\quad + \frac{q_1(p_{3k}) a_{1n}(p_{3k}) e^{p_{3k} t}}{Q_1'(p_{3k}) \det(A(p_{3k}))} + []^* + \frac{q_2(p_4) a_{2n}(p_4) e^{p_4 t}}{Q_2'(p_4) \det(A(p_4))} + []^* ,
 \end{aligned}$$

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.

Раскрыв определители и свернув комплексно-сопряжённые выражения значения фазных токов запишутся как

$$\begin{aligned}
i_n(t) = & U_{m1} \left(\frac{(A_1 B_{2n-1} + A_2 B_{2n}) \cos(\omega_1 t)}{2(A_1^2 + A_2^2)} + \right. \\
& + \frac{(A_2 B_{2n-1} - A_1 B_{2n}) \sin(\omega_1 t)}{2(A_1^2 + A_2^2)} + \\
& + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(A_{3k} C_{2nk} - A_{4k} C_{(2n-1)k}) \cos(((2k-1)\Omega - \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)} + \right. \\
& + \frac{(A_{3k} C_{(2n-1)k} + A_{4k} C_{2nk}) \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)} + \\
& + \frac{(A_{5k} D_{2nk} - A_{6k} D_{(2n-1)k}) \cos(((2k-1)\Omega + \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)} + \\
& + \left. \frac{(A_{5k} D_{(2n-1)k} + A_{6k} D_{2nk}) \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)} \right) + \\
& + U_{m2} \left(\frac{(A_7 E_{2n} - A_8 E_{2n-1}) \cos(\omega_2 t + \gamma)}{A_7^2 + A_8^2} + \right. \\
& + \left. \frac{(A_7 E_{2n-1} + A_8 E_{2n}) \sin(\omega_2 t + \gamma)}{A_7^2 + A_8^2} \right) = U_{m1} (T_{1n} \sin(\omega_1 t + \delta_{1n}) + \\
& + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} (T_{2nk} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{2nk}) + \\
& + T_{3nk} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{3nk})) + U_{m2} T_{4n} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{4n}),
\end{aligned} \tag{2.3}$$

где коэффициенты и начальные фазы гармонических составляющих токов представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

| Амплитуды | Фазы |
|--|---|
| $T_{1n} = \frac{\sqrt{(A_1 B_{2n-1} + A_2 B_{2n})^2 + (A_2 B_{2n-1} - A_1 B_{2n})^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{1n} = \text{Arctg} \frac{A_1 B_{2n-1} + A_2 B_{2n}}{A_2 B_{2n-1} - A_1 B_{2n}}$ |
| $T_{2nk} = \frac{\sqrt{(A_{3k} C_{2nk} - A_{4k} C_{(2n-1)k})^2 + (A_{3k} C_{(2n-1)k} + A_{4k} C_{2nk})^2}}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)}$ | $\delta_{2nk} = \text{Arctg} \frac{A_{3k} C_{2nk} - A_{4k} C_{(2n-1)k}}{A_{3k} C_{(2n-1)k} + A_{4k} C_{2nk}}$ |
| $T_{3nk} = \frac{\sqrt{(A_{5k} D_{2nk} - A_{6k} D_{(2n-1)k})^2 + (A_{5k} D_{(2n-1)k} + A_{6k} D_{2nk})^2}}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)}$ | $\delta_{3nk} = \text{Arctg} \frac{A_{5k} D_{2nk} - A_{6k} D_{(2n-1)k}}{A_{5k} D_{(2n-1)k} + A_{6k} D_{2nk}}$ |
| $T_{4n} = \frac{\sqrt{(A_7 E_{2n} - A_8 E_{2n-1})^2 + (A_7 E_{2n-1} + A_8 E_{2n})^2}}{A_7^2 + A_8^2}$ | $\delta_{4n} = \text{Arctg} \frac{A_7 E_{2n} - A_8 E_{2n-1}}{A_7 E_{2n-1} + A_8 E_{2n}}$ |

С учётом (2.3) токи асинхронного двигателя запишутся как:

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha s}(t) = & U_{m1} \left(\begin{aligned} & T_{11} \sin(\omega_1 t + \delta_{11}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{aligned} & T_{21k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{21k}) + \\ & + T_{31k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{31k}) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) + \\
 & + U_{m2} T_{41} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{41}); \\
 i_{\beta s}(t) = & U_{m1} \left(\begin{aligned} & T_{12} \sin(\omega_1 t + \delta_{12}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{aligned} & T_{22k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{22k}) + \\ & + T_{32k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{32k}) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) + \\
 & + U_{m2} T_{42} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{42}); \\
 i_{\gamma r}(t) = & U_{m1} \left(\begin{aligned} & T_{13} \sin(\omega_1 t + \delta_{13}) + \\ & + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{aligned} & T_{23k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{23k}) + \\ & + T_{33k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{33k}) \end{aligned} \right) \end{aligned} \right) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +U_{m2}T_{43} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{43}); \\
i_{\beta r}(t) = & U_{m1} \left(+\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{aligned} & T_{14} \sin(\omega_1 t + \delta_{14}) + \\ & T_{24k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{24k}) + \\ & +T_{34k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{34k}) \end{aligned} \right) \right) + \\
& +U_{m2}T_{44} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{44}),
\end{aligned}$$

где значения коэффициентов и начальных фаз гармонических составляющих токов представлены в табл. 2.3 и 2.4.

Таблица 2.3

| Ток | Амплитуды | Фазы |
|----------------|--|---|
| $i_{\alpha s}$ | $T_{11} = \frac{\sqrt{(A_1 B_1 + A_2 B_2)^2 + (A_2 B_1 - A_1 B_2)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{11} = \text{Arctg} \frac{A_1 B_1 + A_2 B_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2}$ |
| | $T_{21k} = \frac{\sqrt{(A_{3k} C_{2k} - A_{4k} C_{1k})^2 + (A_{3k} C_{1k} + A_{4k} C_{2k})^2}}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)}$ | $\delta_{21k} = \text{Arctg} \frac{A_{3k} C_{2k} - A_{4k} C_{1k}}{A_{3k} C_{1k} + A_{4k} C_{2k}}$ |
| | $T_{31k} = \frac{\sqrt{(A_{5k} D_{2k} - A_{6k} D_{1k})^2 + (A_{5k} D_{1k} + A_{6k} D_{2k})^2}}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)}$ | $\delta_{31k} = \text{Arctg} \frac{A_{5k} D_{2k} - A_{6k} D_{1k}}{A_{5k} D_{1k} + A_{6k} D_{2k}}$ |
| | $T_{41} = \frac{\sqrt{(A_7 E_2 - A_8 E_1)^2 + (A_7 E_1 + A_8 E_2)^2}}{A_7^2 + A_8^2}$ | $\delta_{41} = \text{Arctg} \frac{A_7 E_2 - A_8 E_1}{A_7 E_1 + A_8 E_2}$ |
| $i_{\beta s}$ | $T_{12} = \frac{\sqrt{(A_1 B_3 + A_2 B_4)^2 + (A_2 B_3 - A_1 B_4)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{12} = \text{Arctg} \frac{A_1 B_3 + A_2 B_4}{A_2 B_3 - A_1 B_4}$ |
| | $T_{22k} = \frac{\sqrt{(A_{3k} C_{4k} - A_{4k} C_{3k})^2 + (A_{3k} C_{3k} + A_{4k} C_{4k})^2}}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)}$ | $\delta_{22k} = \text{Arctg} \frac{A_{3k} C_{4k} - A_{4k} C_{3k}}{A_{3k} C_{3k} + A_{4k} C_{4k}}$ |
| | $T_{32k} = \frac{\sqrt{(A_{5k} D_{4k} - A_{6k} D_{3k})^2 + (A_{5k} D_{3k} + A_{6k} D_{4k})^2}}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)}$ | $\delta_{32k} = \text{Arctg} \frac{A_{5k} D_{4k} - A_{6k} D_{3k}}{A_{5k} D_{3k} + A_{6k} D_{4k}}$ |

| | | |
|----------------|--|---|
| | $T_{42} = \frac{\sqrt{(A_7E_4 - A_8E_3)^2 + (A_7E_3 + A_8E_4)^2}}{A_7^2 + A_8^2}$ | $\delta_{42} = \text{Arctg} \frac{A_7E_4 - A_8E_3}{A_7E_3 + A_8E_4}$ |
| $i_{\omega r}$ | $T_{13} = \frac{\sqrt{(A_1B_5 + A_2B_6)^2 + (A_2B_5 - A_1B_6)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{13} = \text{Arctg} \frac{A_1B_5 + A_2B_6}{A_2B_5 - A_1B_6}$ |
| | $T_{23k} = \frac{\sqrt{(A_{3k}C_{6k} - A_{4k}C_{5k})^2 + (A_{3k}C_{5k} + A_{4k}C_{6k})^2}}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)}$ | $\delta_{23k} = \text{Arctg} \frac{A_{3k}C_{6k} - A_{4k}C_{5k}}{A_{3k}C_{5k} + A_{4k}C_{6k}}$ |
| | $T_{33k} = \frac{\sqrt{(A_{5k}D_{6k} - A_{6k}D_{5k})^2 + (A_{5k}D_{5k} + A_{6k}D_{6k})^2}}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)}$ | $\delta_{33k} = \text{Arctg} \frac{A_{5k}D_{6k} - A_{6k}D_{5k}}{A_{5k}D_{5k} + A_{6k}D_{6k}}$ |
| | $T_{43} = \frac{\sqrt{(A_7E_6 - A_8E_5)^2 + (A_7E_5 + A_8E_6)^2}}{A_7^2 + A_8^2}$ | $\delta_{43} = \text{Arctg} \frac{A_7E_6 - A_8E_5}{A_7E_5 + A_8E_6}$ |
| $i_{\beta r}$ | $T_{14} = \frac{\sqrt{(A_1B_7 + A_2B_8)^2 + (A_2B_7 - A_1B_8)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{14} = \text{Arctg} \frac{A_1B_7 + A_2B_8}{A_2B_7 - A_1B_8}$ |
| | $T_{24k} = \frac{\sqrt{(A_{3k}C_{8k} - A_{4k}C_{7k})^2 + (A_{3k}C_{7k} + A_{4k}C_{8k})^2}}{(2k-1)(A_{3k}^2 + A_{4k}^2)}$ | $\delta_{24k} = \text{Arctg} \frac{A_{3k}C_{8k} - A_{4k}C_{7k}}{A_{3k}C_{7k} + A_{4k}C_{8k}}$ |
| | $T_{34k} = \frac{\sqrt{(A_{5k}D_{8k} - A_{6k}D_{7k})^2 + (A_{5k}D_{7k} + A_{6k}D_{8k})^2}}{(2k-1)(A_{5k}^2 + A_{6k}^2)}$ | $\delta_{34k} = \text{Arctg} \frac{A_{5k}D_{8k} - A_{6k}D_{7k}}{A_{5k}D_{7k} + A_{6k}D_{8k}}$ |
| | $T_{44} = \frac{\sqrt{(A_7E_8 - A_8E_7)^2 + (A_7E_7 + A_8E_8)^2}}{A_7^2 + A_8^2}$ | $\delta_{44} = \text{Arctg} \frac{A_7E_8 - A_8E_7}{A_7E_7 + A_8E_8}$ |

Таблица 2.4

| | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> |
|---|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1 | $A_1=a_1+a_2\omega^2$ | $B_1=b_1+b_2\omega^2$ | $C_{1k}=c_{1k}+c_2\omega^2$ | $D_{1k}=d_{1k}+d_2\omega^2$ | $E_1=e_1=0$ |
| 2 | $A_2=a_3+a_4\omega^2$ | $B_2=b_3+b_4\omega^2$ | $C_{2k}=c_{3k}+c_{4k}\omega^2$ | $D_{2k}=d_{3k}+d_{4k}\omega^2$ | $E_2=e_2\omega$ |
| 3 | $A_{3k}=a_{5k}+a_{6k}\omega^2$ | $B_3=b_5=0$ | $C_3=c_5=0$ | $D_3=d_5=0$ | $E_3=e_3+e_4\omega^2$ |
| 4 | $A_{4k}=a_{7k}+a_{8k}\omega^2$ | $B_4=b_6\omega$ | $C_{4k}=c_{6k}\omega$ | $D_{4k}=d_{6k}\omega$ | $E_4=e_5+e_6\omega^2$ |
| 5 | $A_{5k}=a_{9k}+a_{10k}\omega^2$ | $B_5=b_7+b_8\omega^2$ | $C_{5k}=c_{7k}+c_8\omega^2$ | $D_{5k}=d_{7k}+d_8\omega^2$ | $E_5=e_7\omega$ |
| 6 | $A_{6k}=a_{11k}+a_{12k}\omega^2$ | $B_6=b_9+b_{10}\omega^2$ | $C_{6k}=c_{9k}+c_{10}\omega^2$ | $D_{6k}=d_{9k}+d_{10}\omega^2$ | $E_6=e_8\omega$ |
| 7 | $A_7=a_{13}+a_{14}\omega^2$ | $B_7=b_{11}\omega$ | $C_7=c_{11}\omega$ | $D_7=d_{11}\omega$ | $E_7=e_9+e_{10}\omega^2$ |
| 8 | $A_8=a_{15}+a_{16}\omega^2$ | $B_8=b_{12}\omega$ | $C_{8k}=c_{12k}\omega$ | $D_{8k}=d_{12k}\omega$ | $E_8=e_{11}+e_{12}\omega^2$ |

где значение величин a_x, b_x, c_x, d_x, e_x приведены в приложении 1

Пятое уравнение системы (2.1), 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.

Согласно (2.1) электромагнитный момент:

$$M_{\text{эм}}(t) = k_{\text{д}} \left(M_{\alpha} i_{\alpha s}(t) i_{\beta r}(t) - M_{\beta} i_{\beta s}(t) i_{\alpha r}(t) \right).$$

Разложим выражение для электромагнитного момента в ряд Маклорена по степеням ω в окрестностях точки $\omega = 0$:

$$M_{\text{эм}}(\omega) = M_{\text{эм}}(0) + M'_{\text{эм}}(0)\omega + \dots$$

Пренебрегая составляющей сухого трения, которая может быть учтена, при необходимости, согласно исследованию [90], и с учетом системы (2.1) уравнение движения привода можно записать:

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

где $M_{\text{п}} = M_{\text{эм}}(0)$ – пусковой момент, $M_{\text{демп}} = M'_{\text{эм}}(0)\omega = F_{\text{демп}}\omega$ – демпфирующий момент и

$$F_{\text{демп}} = M'_{\text{эм}}(\omega) = k_{\text{д}} \left(M_{\alpha} (i'_{\alpha s} i_{\beta r} + i_{\alpha s} i'_{\beta r}) - M_{\beta} (i'_{\beta s} i_{\alpha r} + i_{\beta s} i'_{\alpha r}) \right) \quad (2.4)$$

– коэффициент электромагнитного демпфирования.

Для определения составляющих электромагнитного момента необходимо найти значение пусковых токов АД и их первых производных по ω (табл. 2.5).

Таблица 2.5

| | |
|----------------|--|
| $i_{\alpha s}$ | $i_{\alpha s}(t) _{\omega=0} = U_{m1} \left(\begin{array}{l} T_{011} \sin(\omega_1 t + \delta_{011}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} T_{021k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{021k}) + \\ + T_{031k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{031k}) \end{array} \right) \end{array} \right)$ |
| | $\left. \frac{di_{\alpha s}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m2} T_{141} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{141})$ |
| $i_{\beta s}$ | $i_{\beta s}(t) _{\omega=0} = U_{m2} T_{042} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{042})$ |
| | $\left. \frac{di_{\beta s}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m1} \left(\begin{array}{l} T_{112} \sin(\omega_1 t + \delta_{112}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} T_{122k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{122k}) + \\ + T_{132k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{132k}) \end{array} \right) \end{array} \right)$ |
| $i_{\alpha r}$ | $i_{\alpha r}(t) _{\omega=0} = U_{m1} \left(\begin{array}{l} T_{013} \sin(\omega_1 t + \delta_{013}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} T_{023k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{023k}) + \\ + T_{033k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{033k}) \end{array} \right) \end{array} \right)$ |

| | |
|---------------|---|
| | $\left. \frac{di_{\alpha r}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m2} T_{143} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{143})$ |
| | $i_{\beta r}(t) \Big _{\omega=0} = U_{m2} T_{044} \sin(\omega_2 t + \gamma + \delta_{044})$ |
| $i_{\beta r}$ | $\left. \frac{di_{\beta r}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} =$ $= U_{m1} \left(T_{114} \sin(\omega_1 t + \delta_{114}) + \right.$ $\left. + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{124k} \sin \left(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{124k} \right) + \right.$ $\left. + T_{134k} \sin \left(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{134k} \right) \right)$ |

Здесь значения амплитуд и фаз гармонических составляющих токов представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6

| Ток | Амплитуды | Фазы |
|----------------|---|--|
| $i_{\alpha s}$ | $T_{011} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b_1^2 + b_3^2}{a_1^2 + a_3^2}}$ | $\delta_{011} = \text{Arctg} \frac{a_1 b_1 + a_3 b_3}{a_3 b_1 - a_1 b_3}$ |
| | $T_{021k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{c_{1k}^2 + c_{3k}^2}{a_{5k}^2 + a_{7k}^2}}$ | $\delta_{021k} = \text{Arctg} \frac{a_{5k} c_{3k} - a_{7k} c_{1k}}{a_{5k} c_{1k} + a_{7k} c_{3k}}$ |
| | $T_{031k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{d_{1k}^2 + d_{3k}^2}{a_{9k}^2 + a_{11k}^2}}$ | $\delta_{031k} = \text{Arctg} \frac{a_{9k} d_{3k} - a_{11k} d_{1k}}{a_{9k} d_{1k} + a_{11k} d_{3k}}$ |
| | $T_{141} = \frac{e_2 \sqrt{a_{13}^2 + a_{15}^2}}{a_{13}^2 + a_{15}^2}$ | $\delta_{141} = \text{Arctg} \frac{a_{13}}{a_{15}}$ |
| $i_{\beta s}$ | $T_{042} = \sqrt{\frac{e_3^2 + e_5^2}{a_{13}^2 + a_{15}^2}}$ | $\delta_{042} = \text{Arctg} \frac{a_{13} e_5 - a_{15} e_3}{a_{13} e_3 + a_{15} e_5}$ |
| | $T_{112} = \frac{b_6 \sqrt{a_1^2 + a_3^2}}{2(a_1^2 + a_3^2)}$ | $\delta_{112} = \text{Arctg} \left(-\frac{a_3}{a_1} \right)$ |
| | $T_{122k} = \frac{c_{6k} \sqrt{a_{5k}^2 + a_{7k}^2}}{(2k-1)(a_{5k}^2 + a_{7k}^2)}$ | $\delta_{122k} = \text{Arctg} \frac{a_{5k}}{a_{7k}}$ |

| | | |
|----------|--|--|
| | $T_{132k} = \frac{d_{6k}\sqrt{a_{9k}^2 + a_{11k}^2}}{(2k-1)(a_{9k}^2 + a_{11k}^2)}$ | $\delta_{132k} = \text{Arctg} \frac{a_{9k}}{a_{11k}}$ |
| i_{ar} | $T_{013} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b_7^2 + b_9^2}{a_1^2 + a_3^2}}$ | $\delta_{013} = \text{Arctg} \frac{a_1 b_7 + a_3 b_9}{a_3 b_7 - a_1 b_9}$ |
| | $T_{023k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{c_{7k}^2 + c_{9k}^2}{a_{5k}^2 + a_{7k}^2}}$ | $\delta_{023k} = \text{Arctg} \frac{a_{5k} c_{9k} - a_{7k} c_{7k}}{a_{5k} c_{7k} + a_{7k} c_{9k}}$ |
| | $T_{033k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{d_{7k}^2 + d_{9k}^2}{a_{9k}^2 + a_{11k}^2}}$ | $\delta_{033k} = \text{Arctg} \frac{a_{9k} d_{9k} - a_{11k} d_{7k}}{a_{9k} d_{7k} + a_{11k} d_{9k}}$ |
| | $T_{143} = \sqrt{\frac{e_7^2 + e_8^2}{a_{13}^2 + a_{15}^2}}$ | $\delta_{143} = \text{Arctg} \frac{a_{13} e_8 - a_{15} e_7}{a_{13} e_7 + a_{15} e_8}$ |
| i_{br} | $T_{044} = \sqrt{\frac{e_9^2 + e_{11}^2}{a_{13}^2 + a_{15}^2}}$ | $\delta_{044} = \text{Arctg} \frac{a_{13} e_{11} - a_{15} e_9}{a_{13} e_9 + a_{15} e_{11}}$ |
| | $T_{114} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b_{11}^2 + b_{12}^2}{a_1^2 + a_3^2}}$ | $\delta_{114} = \text{Arctg} \frac{a_1 b_{11} + a_3 b_{12}}{a_3 b_{11} - a_1 b_{12}}$ |
| | $T_{124k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{c_{11}^2 + c_{12k}^2}{a_{5k}^2 + a_{7k}^2}}$ | $\delta_{124k} = \text{Arctg} \frac{a_{5k} c_{12k} - a_{7k} c_{11}}{a_{5k} c_{11} + a_{7k} c_{12k}}$ |
| | $T_{134k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{d_{11}^2 + d_{12k}^2}{a_{9k}^2 + a_{11k}^2}}$ | $\delta_{134k} = \text{Arctg} \frac{a_{9k} d_{12k} - a_{11k} d_{11}}{a_{9k} d_{11} + a_{11k} d_{12k}}$ |

С учётом табл. 2.6, пренебрегая составляющими пускового момента с частотами, намного превосходящими Ω в связи с незначительностью их влияния на закон движения, запишем выражение для пускового момента:

$$M_{\Pi}(t) = N_1 \sin(\Omega t + \varphi_1) + \sum_{k=1}^{\infty} N_{2k} \sin((2k-2)\Omega t + \varphi_{2k}) + N_{3k} \sin(2k\Omega t + \varphi_{3k}), \quad (2.5)$$

где

$$N_1 = \frac{k_d U_{m1} U_{m2}}{2} \sqrt{M_\alpha^2 T_{011}^2 T_{044}^2 + M_\beta^2 T_{013}^2 T_{042}^2 - 2M_\alpha M_\beta T_{011} T_{013} T_{042} T_{044} \cos(\delta_{011} - \delta_{013} + \delta_{042} - \delta_{044})} ;$$

$$\varphi_1 = \text{Arctg} \left(\frac{-M_\alpha T_{011} T_{044} \sin(\gamma - \delta_{011} + \delta_{044}) + M_\beta T_{013} T_{042} \sin(\gamma - \delta_{013} + \delta_{042})}{M_\alpha T_{011} T_{044} \cos(\gamma - \delta_{011} + \delta_{044}) - M_\beta T_{013} T_{042} \cos(\gamma - \delta_{013} + \delta_{042})} \right) + \frac{\pi}{2} ;$$

$$N_{2k} =$$

$$= \frac{k_d U_{m1} U_{m2}}{2\pi} \sqrt{M_\alpha^2 T_{021k}^2 T_{044}^2 + M_\beta^2 T_{023k}^2 T_{042}^2 - 2M_\alpha M_\beta T_{021k} T_{023k} T_{042} T_{044} \cos(\delta_{021k} - \delta_{023k} - \delta_{042} + \delta_{044})} ;$$

$$\varphi_{2k} = \text{Arctg} \left(\frac{-M_\alpha T_{021k} T_{044} \sin(\gamma + \delta_{021k} + \delta_{044}) + M_\beta T_{023k} T_{042} \sin(\gamma + \delta_{023k} + \delta_{042})}{-M_\alpha T_{021k} T_{044} \cos(\gamma + \delta_{021k} + \delta_{044}) + M_\beta T_{023k} T_{042} \cos(\gamma + \delta_{023k} + \delta_{042})} \right) + \frac{\pi}{2} ;$$

$$N_{3k} =$$

$$= \frac{k_d U_{m1} U_{m2}}{2\pi} \sqrt{M_\alpha^2 T_{031k}^2 T_{044}^2 + M_\beta^2 T_{033k}^2 T_{042}^2 - 2M_\alpha M_\beta T_{031k} T_{033k} T_{042} T_{044} \cos(\delta_{031k} - \delta_{033k} + \delta_{042} - \delta_{044})} ;$$

$$\varphi_{3k} = \text{Arctg} \left(\frac{-M_\alpha T_{031k} T_{044} \sin(\gamma - \delta_{031k} + \delta_{044}) + M_\beta T_{033k} T_{042} \sin(\gamma - \delta_{033k} + \delta_{042})}{M_\alpha T_{031k} T_{044} \cos(\gamma - \delta_{031k} + \delta_{044}) - M_\beta T_{033k} T_{042} \cos(\gamma - \delta_{033k} + \delta_{042})} \right) + \frac{\pi}{2} .$$

Коэффициент электромагнитного демпфирования двигателя найдём с учётом полученных ранее токов и их производных по ω , подставив их в выражение (2.4) и отбросив периодические составляющие, зависящие от времени в связи с незначительностью их влияния [31]:

$$F_{\text{демп}} = k_{\text{д}} \begin{pmatrix} M_{\alpha} \left(\frac{U_{m2}^2 T_{141} T_{044}}{2} \cos(\delta_{141} - \delta_{044}) + \frac{U_{m1}^2 T_{011} T_{114}}{2} \cos(\delta_{011} - \delta_{114}) \right) - \\ -M_{\beta} \left(\frac{U_{m1}^2 T_{112} T_{013}}{2} \cos(\delta_{112} - \delta_{013}) + \frac{U_{m2}^2 T_{042} T_{143}}{2} \cos(\delta_{042} - \delta_{143}) \right) \end{pmatrix}.$$

Зависимость перемещения от времени будем искать методом гармонического [58] баланса в виде, подобном правой части (2.5)

$$\chi(t) = \chi_1 \sin(\Omega t + \alpha_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \chi_{2k} \sin((2k-2)\Omega t + \alpha_{2k}) + \chi_{3k} \sin(2k\Omega t + \alpha_{3k}). \quad (2.6)$$

Подставляя выражение для нахождения перемещения в пятое уравнение системы, найдём амплитуды и фазы пульсаций.

$$\begin{aligned} \chi_1 &= \sqrt{\chi_{11}^2 + \chi_{12}^2}; \\ \chi_{2k} &= \sqrt{\chi_{21k}^2 + \chi_{22k}^2}; \\ \chi_{3k} &= \sqrt{\chi_{31k}^2 + \chi_{32k}^2}; \\ \chi_{11} &= \frac{N_{11}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2) - N_{12}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2\Omega^2}; \\ \chi_{12} &= \frac{N_{12}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2) + N_{11}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2\Omega^2}; \\ \chi_{21k} &= \frac{N_{21k}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2) - N_{22k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})(2k-2)\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2(2k-2)^2\Omega^2}; \\ \chi_{22k} &= \frac{N_{22k}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2) + N_{21k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})(2k-2)\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2(2k-2)^2\Omega^2}; \\ \chi_{31k} &= \frac{N_{31k}(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2) - 2N_{32k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})k\Omega}{(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2)^2 + 4(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2k^2\Omega^2}; \end{aligned}$$

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

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

Здесь

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

Рассмотрим частный случай фазовой модуляции, когда одна из обмоток АД питается постоянным напряжением, а на вторую подаётся пульсирующее напряжение с частотой Ω . Для этого в выражениях (2.2) положим $\omega_1 = \omega_2 = 0$ и $\gamma = \pi / 2$.

Тогда пусковой момент с учётом токов, полученных ранее, может быть записан как:

$$M_{\text{п}} = N_1 \sin \varphi_1 + \sum_{k=1}^{\infty} N_{2k} \sin((2k - 1)\Omega t + \varphi_{2k}), \quad (2.7)$$

где

$$N_{11} = \frac{k_{\text{д}} M_{\alpha} U_{m1} U_{m2} T_{011} T_{044}}{2} \sqrt{2(1 - \cos(2(\delta_{044} + \gamma)))};$$

$$N_{12} = \frac{-k_{\text{д}} M_{\beta} U_{m1} U_{m2} T_{013} T_{042}}{2} \sqrt{2(1 - \cos(2\delta_{013}))};$$

$$\varphi_{11} = \text{Arctg} \left(\frac{\sin(\delta_{011} - \delta_{044} - \gamma) - \sin(\delta_{011} + \delta_{044} + \gamma)}{\cos(\delta_{011} - \delta_{044} - \gamma) - \cos(\delta_{011} + \delta_{044} + \gamma)} \right) + \frac{\pi}{2};$$

$$\varphi_{12} = \text{Arctg} \left(\frac{\sin(\delta_{042} - \delta_{013} + \gamma) - \sin(\delta_{042} + \delta_{013} + \gamma)}{\cos(\delta_{042} - \delta_{013} + \gamma) - \cos(\delta_{042} + \delta_{013} + \gamma)} \right) + \frac{\pi}{2};$$

$$N_1 = \sqrt{N_{11}^2 + N_{12}^2 + 2N_{11}N_{12} \cos(\varphi_{12} - \varphi_{11})};$$

$$\varphi_1 = \text{Arctg} \left(\frac{N_{11} \sin \varphi_{11} + N_{12} \sin \varphi_{12}}{N_{11} \cos \varphi_{11} + N_{12} \cos \varphi_{12}} \right);$$

$$\begin{aligned}
N_{21k} &= \frac{k_d M_\alpha U_{m1} U_{m2} T_{021k} T_{044}}{2\pi} \sqrt{2(1 - \cos(2(\delta_{044} + \gamma)))}; \\
N_{22k} &= \frac{-k_d M_\beta U_{m1} U_{m2} T_{023k} T_{042}}{2\pi} \sqrt{2(1 - \cos(2(\delta_{042} + \gamma)))}; \\
N_{23k} &= \frac{k_d M_\alpha U_{m1} U_{m2} T_{031k} T_{044}}{2\pi} \sqrt{2(1 - \cos(2(\delta_{044} + \gamma)))}; \\
N_{24k} &= \frac{-k_d M_\beta U_{m1} U_{m2} T_{033k} T_{042}}{2\pi} \sqrt{2(1 - \cos(2(\delta_{042} + \gamma)))}; \\
\varphi_{21k} &= \text{Arctg} \left(\frac{\sin(\delta_{021k} - \delta_{044} - \gamma) - \sin(\delta_{021k} + \delta_{044} + \gamma)}{\cos(\delta_{021k} - \delta_{044} - \gamma) - \cos(\delta_{021k} + \delta_{044} + \gamma)} \right) + \frac{\pi}{2}; \\
\varphi_{22k} &= \text{Arctg} \left(\frac{\sin(\delta_{023k} - \delta_{042} - \gamma) - \sin(\delta_{023k} + \delta_{042} + \gamma)}{\cos(\delta_{023k} - \delta_{042} - \gamma) - \cos(\delta_{023k} + \delta_{042} + \gamma)} \right) + \frac{\pi}{2}; \\
\varphi_{23k} &= \text{Arctg} \left(\frac{\sin(\delta_{031k} - \delta_{044} - \gamma) - \sin(\delta_{031k} + \delta_{044} + \gamma)}{\cos(\delta_{031k} - \delta_{044} - \gamma) - \cos(\delta_{031k} + \delta_{044} + \gamma)} \right) + \frac{\pi}{2}; \\
\varphi_{24k} &= \text{Arctg} \left(\frac{\sin(\delta_{033k} - \delta_{042} - \gamma) - \sin(\delta_{033k} + \delta_{042} + \gamma)}{\cos(\delta_{033k} - \delta_{042} - \gamma) - \cos(\delta_{033k} + \delta_{042} + \gamma)} \right) + \frac{\pi}{2}; \\
N_{25k} &= \sqrt{N_{21k}^2 + N_{22k}^2 + 2N_{21k}N_{22k} \cos(\varphi_{22k} - \varphi_{21k})}; \\
N_{26k} &= \sqrt{N_{23k}^2 + N_{24k}^2 + 2N_{23k}N_{24k} \cos(\varphi_{24k} - \varphi_{23k})}; \\
\varphi_{25k} &= \text{Arctg} \left(\frac{N_{21k} \sin \varphi_{21k} + N_{22k} \sin \varphi_{22k}}{N_{21k} \cos \varphi_{21k} + N_{22k} \cos \varphi_{22k}} \right); \\
\varphi_{26k} &= \text{Arctg} \left(\frac{N_{23k} \sin \varphi_{23k} + N_{24k} \sin \varphi_{24k}}{N_{23k} \cos \varphi_{23k} + N_{24k} \cos \varphi_{24k}} \right); \\
N_{2k} &= \sqrt{N_{25k}^2 + N_{26k}^2 + 2N_{25k}N_{26k} \cos(\varphi_{26k} - \varphi_{25k})}; \\
\varphi_{2k} &= \text{Arctg} \left(\frac{N_{25k} \sin \varphi_{25k} + N_{26k} \sin \varphi_{26k}}{N_{25k} \cos \varphi_{25k} + N_{26k} \cos \varphi_{26k}} \right).
\end{aligned}$$

Применив метод гармонического баланса [58] найдём зависимость перемещения подвижного элемента привода от времени в виде подобном правой части (2.7):

$$\chi(t) = \chi_1 \sin \alpha_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \chi_{2k} \sin((2k - 1)\Omega t + \alpha_{2k}) , \quad (2.8)$$

где

$$\chi_1 = \frac{N_1 \sin \varphi_1}{C_{\text{мех}} \sin \alpha_1} ;$$

$$\chi_{21k} = \frac{N_{21k}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k - 1)^2\Omega^2) - N_{22k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})(2k - 1)\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k - 1)^2\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2(2k - 1)^2\Omega^2} ;$$

$$\chi_{22k} = \frac{N_{22k}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k - 1)^2\Omega^2) + N_{21k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})(2k - 1)\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k - 1)^2\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2(2k - 1)^2\Omega^2} ;$$

$$\chi_{2k} = \sqrt{\chi_{21k}^2 + \chi_{22k}^2} ;$$

$$\alpha_{2k} = \text{Arctg} \frac{\chi_{21k}}{\chi_{22k}} .$$

Полученные выражения составляют теоретическую основу для определения энергетических характеристик АД при работе его в пульсирующем режиме за счёт фазовой модуляции питающих напряжений, как для общего, так и для частного случаев.

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 [19]. Параметры исполнительного двигателя представлены в таблице. 2.7.

Таблица 2.7

| Мощность, кВт | Номинальная частота вращения, об/мин | Номинальное напряжение, В | Номинальный ток, А | КПД | cosφ | 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 ² | Число пар полюсов | Сопротивление взаимоиндуктивности, Ом | Активное сопротивление обмотки статора, Ом | Активное сопротивление обмотки ротора, Ом | Сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом | Сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом |
|----------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--|---|---|--|
| 2,1*10 ⁻³ | 1 | 149,035 | 9,195 | 8,564 | 10,218 | 13,143 |

В качестве примера представлены токи обмотки статора АД (рис. 2.1), найденные согласно выражению (2.3) (кривая 1) и в результате

математического моделирования (кривая 2), а также закон изменения координаты положения подвижного элемента привода $\chi(t)$ (рис. 2.2). 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.

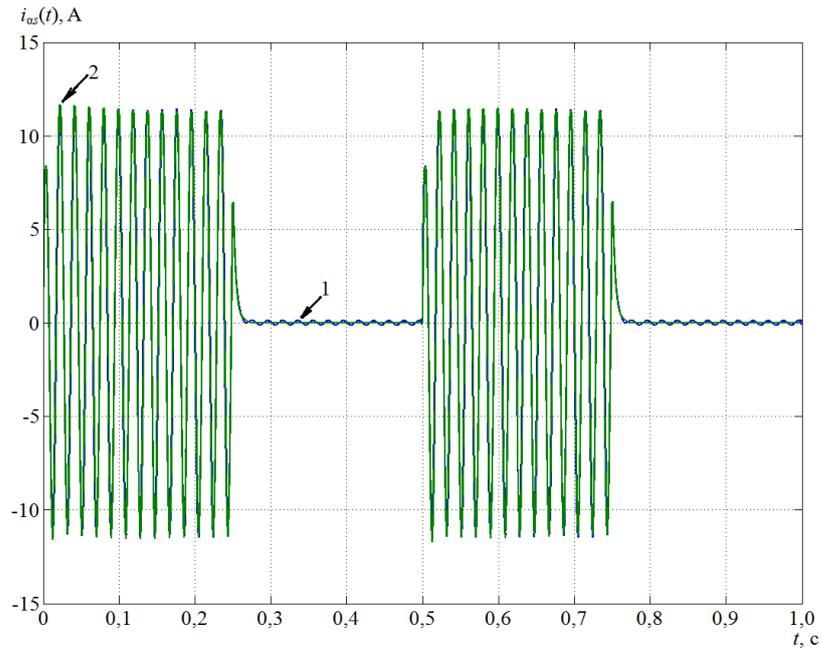


Рис. 2.1. Ток фазы $i_{as}(t)$ асинхронного двигателя: 1 – результаты аналитического расчёта; 2 – результаты математического моделирования

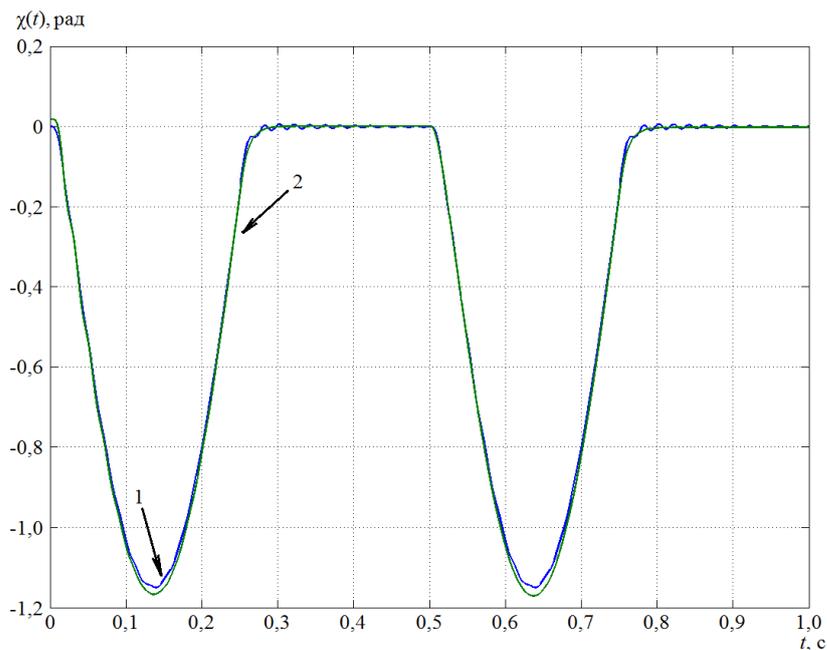


Рис. 2.2. Законы изменения координаты подвижного элемента привода $\chi(t)$: 1 – результаты аналитического расчёта; 2 – результаты математического моделирования

2.1.2. Потенциальная балансно-амплитудная модуляция

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

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

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

где

$$A(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)\Omega t)}{2k-1}.$$

Операторные изображения питающих напряжений запишутся как:

$$U_{\alpha s}(p) = \frac{U_{m1}}{2} \left(\frac{\omega_1 - \Omega}{p^2 + (\omega_1 - \Omega)^2} + \frac{\omega_1 + \Omega}{p^2 + (\omega_1 + \Omega)^2} \right);$$

$$U_{\beta s}(p) = U_{m2} \left(\frac{p}{2(p^2 + \omega^2)} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{(2k-1)\Omega - \omega_1}{(p^2 + ((2k-1)\Omega - \omega_1)^2)(2k-1)} + \frac{(2k-1)\Omega + \omega_1}{(p^2 + ((2k-1)\Omega + \omega_1)^2)(2k-1)} \right) \right).$$

Определим корни полиномов $U_{\alpha s}(p)$ и $U_{\beta s}(p)$ и их первых производных (табл. 2.8)

Таблица 2.8

| № | Корни знаменателей питающих напряжений | Производные знаменателей питающих напряжений |
|---|--|--|
| 1 | $p = \pm j(\omega_1 - \Omega)$ | $2p$ |
| 2 | $p = \pm j(\omega_1 + \Omega)$ | $2p$ |
| 3 | $p = \pm j\omega_1$ | $4p$ |
| 4 | $p = \pm j((2k-1)\Omega - \omega_1)$ | $2(2k-1)p$ |
| 5 | $p = \pm j((2k-1)\Omega + \omega_1)$ | $2(2k-1)p$ |

аналитическое решение для токов в установившемся режиме работы можно найти, применяя теорему разложения [66]:

$$\begin{aligned}
i_n &= \sum_{l=1}^4 \sum_{h=1}^m \frac{q_l(p_h) a_{ln}(p_h) e^{p_h t}}{Q'_l(p_h) \det(A(p_h)) + Q_l(p_h) \det'(A(p_h))} = \\
&= \frac{q_1(p_1) a_{1n}(p_1) e^{p_1 t}}{Q'_1(p_1) \det(A(p_1))} + []^* + \frac{q_1(p_2) a_{1n}(p_2) e^{p_2 t}}{Q'_1(p_2) \det(A(p_2))} + []^* + \\
&+ \frac{q_2(p_3) a_{2n}(p_3) e^{p_3 t}}{Q'_2(p_3) \det(A(p_3))} + []^* + \frac{q_2(p_{4k}) a_{2n}(p_{4k}) e^{p_{4k} t}}{Q'_2(p_{4k}) \det(A(p_{4k}))} + []^* + \\
&\qquad\qquad\qquad + \frac{q_2(p_{5k}) a_{2n}(p_{5k}) e^{p_{5k} t}}{Q'_2(p_{5k}) \det(A(p_{5k}))} + []^* ,
\end{aligned}$$

Раскрыв определители и свернув комплексно-сопряжённые выражения значения фазных токов запишутся как

$$\begin{aligned}
i_n(t) &= \frac{U_{m1}}{2} \left(\frac{(A_1 B_{2n-1} + A_2 B_{2n}) \sin((\omega_1 - \Omega)t)}{A_1^2 + A_2^2} + \right. \\
&+ \frac{(A_1 B_{2n} - A_2 B_{2n-1}) \cos((\omega_1 - \Omega)t)}{A_1^2 + A_2^2} + \\
&+ \frac{(A_3 C_{2n-1} + A_4 C_{2n}) \sin((\omega_1 + \Omega)t)}{A_3^2 + A_4^2} + \\
&+ \left. \frac{(A_3 C_{2n} - A_4 C_{2n-1}) \cos((\omega_1 + \Omega)t)}{A_3^2 + A_4^2} \right) + \\
&+ U_{m2} \left(\frac{(A_5 D_{2n-1} + A_6 D_{2n}) \cos(\omega_1 t) + (A_6 D_{2n-1} - A_5 D_{2n}) \sin(\omega_1 t)}{2(A_5^2 + A_6^2)} + \right. \\
&+ \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(A_{7k} E_{(2n-1)k} + A_{8k} E_{2nk}) \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)} + \\
&+ \frac{(A_{7k} E_{2nk} - A_{8k} E_{(2n-1)k}) \cos(((2k-1)\Omega - \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)} + \\
&+ \frac{(A_{9k} F_{(2n-1)k} + A_{10k} F_{2nk}) \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)} + \\
&+ \left. \frac{(A_{9k} F_{2nk} - A_{10k} F_{(2n-1)k}) \cos(((2k-1)\Omega + \omega_1)t)}{(2k-1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)} \right) = \\
&= U_{m1} (T_{1n} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{1n}) + T_{2n} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{2n})) +
\end{aligned} \tag{2.9}$$

$$\begin{aligned}
& +U_{m2}(T_{3n} \sin(\omega_1 t + \delta_{3n}) + \\
& + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} T_{4nk} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{4nk}) + \\
& \qquad \qquad \qquad + T_{5nk} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{5nk})) ,
\end{aligned}$$

где коэффициенты и начальные фазы гармонических составляющих токов представлены в табл. 2.9.

Таблица 2.9

| Амплитуды | Фазы |
|---|---|
| $T_{1n} = \frac{\sqrt{(A_1 B_{2n-1} + A_2 B_{2n})^2 + (A_2 B_{2n} - A_1 B_{2n-1})^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{1n} = \text{Arctg} \frac{A_1 B_{2n} - A_2 B_{2n-1}}{A_1 B_{2n-1} + A_2 B_{2n}}$ |
| $T_{2n} = \frac{\sqrt{(A_3 C_{2n-1} + A_4 C_{2n})^2 + (A_3 C_{2n} - A_4 C_{2n-1})^2}}{2(A_3^2 + A_4^2)}$ | $\delta_{2n} = \text{Arctg} \frac{A_3 C_{2n} - A_4 C_{2n-1}}{A_3 C_{2n-1} + A_4 C_{2n}}$ |
| $T_{3n} = \frac{\sqrt{(A_5 D_{2n-1} + A_6 D_{2n})^2 + (A_6 D_{2n-1} - A_5 D_{2n})^2}}{2(A_5^2 + A_6^2)}$ | $\delta_{3n} = \text{Arctg} \frac{A_5 D_{2n-1} + A_6 D_{2n}}{A_6 D_{2n-1} - A_5 D_{2n}}$ |
| $T_{4nk} = \frac{\sqrt{(A_{7k} E_{(2n-1)k} + A_{8k} E_{2nk})^2 + (A_{7k} E_{2nk} - A_{8k} E_{(2n-1)k})^2}}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)}$ | $\delta_{4nk} = \text{Arctg} \frac{A_{7k} E_{2nk} - A_{8k} E_{(2n-1)k}}{A_{7k} E_{(2n-1)k} + A_{8k} E_{2nk}}$ |
| $T_{5nk} = \frac{\sqrt{(A_{9k} F_{(2n-1)k} + A_{10k} F_{2nk})^2 + (A_{9k} F_{2nk} - A_{10k} F_{(2n-1)k})^2}}{(2k-1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)}$ | $\delta_{5nk} = \text{Arctg} \frac{A_{9k} F_{2nk} - A_{10k} F_{(2n-1)k}}{A_{9k} F_{(2n-1)k} + A_{10k} F_{2nk}}$ |

С учётом (2.9) токи асинхронного двигателя запишутся как

$$i_{\alpha s}(t) = U_{m1}(T_{11} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{11}) + T_{21} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{21})) +$$

$$+U_{m2} \left(\begin{array}{c} +T_{31} \sin(\omega_1 t + \delta_{31}) + \\ +\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{41k} \sin \left(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{41k} \right) + \right. \\ \left. +T_{51k} \sin \left(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{51k} \right) \right) \end{array} \right);$$

$$i_{\beta s}(t) = U_{m1} (T_{12} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{12}) + T_{22} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{22})) +$$

$$+U_{m2} \left(\begin{array}{c} +T_{32} \sin(\omega_1 t + \delta_{32}) + \\ +\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{42k} \sin \left(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{42k} \right) + \right. \\ \left. +T_{52k} \sin \left(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{52k} \right) \right) \end{array} \right);$$

$$i_{\alpha r}(t) = U_{m1} (T_{13} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{13}) + T_{23} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{23})) +$$

$$+U_{m2} \left(\begin{array}{c} +T_{33} \sin(\omega_1 t + \delta_{33}) + \\ +\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{43k} \sin \left(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{43k} \right) + \right. \\ \left. +T_{53k} \sin \left(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{53k} \right) \right) \end{array} \right);$$

$$i_{\beta r}(t) = U_{m1} (T_{14} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{14}) + T_{24} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{24})) +$$

$$+U_{m2} \left(\begin{array}{c} +T_{34} \sin(\omega_1 t + \delta_{34}) + \\ +\frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{44k} \sin \left(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{44k} \right) + \right. \\ \left. +T_{54k} \sin \left(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{54k} \right) \right) \end{array} \right),$$

где значения коэффициентов и начальных фаз гармонических составляющих токов представлены в табл. 2.10 и 2.11.

Таблица 2.10

| Ток | Амплитуды | Фазы |
|----------------|---|---|
| $i_{\alpha s}$ | $T_{11} = \frac{\sqrt{(A_1 B_1 + A_2 B_2)^2 + (A_1 B_2 - A_2 B_1)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{11} = \text{Arctg} \frac{A_1 B_2 - A_2 B_1}{A_1 B_1 + A_2 B_2}$ |
| | $T_{21} = \frac{\sqrt{(A_3 C_1 + A_4 C_2)^2 + (A_3 C_2 - A_4 C_1)^2}}{2(A_3^2 + A_4^2)}$ | $\delta_{21} = \text{Arctg} \frac{A_3 C_2 - A_4 C_1}{A_3 C_1 + A_4 C_2}$ |
| | $T_{31} = \frac{\sqrt{(A_5 D_1 + A_6 D_2)^2 + (A_6 D_1 - A_5 D_2)^2}}{2(A_5^2 + A_6^2)}$ | $\delta_{31} = \text{Arctg} \frac{A_5 D_1 + A_6 D_2}{A_6 D_1 - A_5 D_2}$ |
| | $T_{41k} = \frac{\sqrt{(A_{7k} E_{1k} + A_{8k} E_{2k})^2 + (A_{7k} E_{2k} - A_{8k} E_{1k})^2}}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)}$ | $\delta_{41k} = \text{Arctg} \frac{A_{7k} E_{2k} - A_{8k} E_{1k}}{A_{7k} E_{1k} + A_{8k} E_{2k}}$ |
| | $T_{51k} = \frac{\sqrt{(A_{9k} F_{1k} + A_{10k} F_{2k})^2 + (A_{9k} F_{2k} - A_{10k} F_{1k})^2}}{(2k-1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)}$ | $\delta_{51k} = \text{Arctg} \frac{A_{9k} F_{2k} - A_{10k} F_{1k}}{A_{9k} F_{1k} + A_{10k} F_{2k}}$ |
| $i_{\beta s}$ | $T_{12} = \frac{\sqrt{(A_1 B_3 + A_2 B_4)^2 + (A_1 B_4 - A_2 B_3)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{12} = \text{Arctg} \frac{A_1 B_4 - A_2 B_3}{A_1 B_3 + A_2 B_4}$ |
| | $T_{22} = \frac{\sqrt{(A_3 C_3 + A_4 C_4)^2 + (A_3 C_4 - A_4 C_3)^2}}{2(A_3^2 + A_4^2)}$ | $\delta_{22} = \text{Arctg} \frac{A_3 C_4 - A_4 C_3}{A_3 C_3 + A_4 C_4}$ |
| | $T_{32} = \frac{\sqrt{(A_5 D_3 + A_6 D_4)^2 + (A_6 D_3 - A_5 D_4)^2}}{2(A_5^2 + A_6^2)}$ | $\delta_{32} = \text{Arctg} \frac{A_5 D_3 + A_6 D_4}{A_6 D_3 - A_5 D_4}$ |
| | $T_{42k} = \frac{\sqrt{(A_{7k} E_{3k} + A_{8k} E_{4k})^2 + (A_{7k} E_{4k} - A_{8k} E_{3k})^2}}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)}$ | $\delta_{42k} = \text{Arctg} \frac{A_{7k} E_{4k} - A_{8k} E_{3k}}{A_{7k} E_{3k} + A_{8k} E_{4k}}$ |

| | | |
|----------------|---|---|
| | $T_{52k} = \frac{\sqrt{(A_{9k}F_{3k} + A_{10k}F_{4k})^2 + (A_{9k}F_{4k} - A_{10k}F_{3k})^2}}{(2k-1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)}$ | $\delta_{52k} = \text{Arctg} \frac{A_{9k}F_{4k} - A_{10k}F_{3k}}{A_{9k}F_{3k} + A_{10k}F_{4k}}$ |
| $i_{\omega r}$ | $T_{13} = \frac{\sqrt{(A_1B_5 + A_2B_6)^2 + (A_1B_6 - A_2B_5)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{13} = \text{Arctg} \frac{A_1B_6 - A_2B_5}{A_1B_5 + A_2B_6}$ |
| | $T_{23} = \frac{\sqrt{(A_3C_5 + A_4C_6)^2 + (A_3C_6 - A_4C_5)^2}}{2(A_3^2 + A_4^2)}$ | $\delta_{23} = \text{Arctg} \frac{A_3C_6 - A_4C_5}{A_3C_5 + A_4C_6}$ |
| | $T_{33} = \frac{\sqrt{(A_5D_5 + A_6D_6)^2 + (A_6D_5 - A_5D_6)^2}}{2(A_5^2 + A_6^2)}$ | $\delta_{33} = \text{Arctg} \frac{A_5D_5 + A_6D_6}{A_6D_5 - A_5D_6}$ |
| | $T_{43k} = \frac{\sqrt{(A_{7k}E_{5k} + A_{8k}E_{6k})^2 + (A_{7k}E_{6k} - A_{8k}E_{5k})^2}}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)}$ | $\delta_{43k} = \text{Arctg} \frac{A_{7k}E_{6k} - A_{8k}E_{5k}}{A_{7k}E_{5k} + A_{8k}E_{6k}}$ |
| | $T_{53k} = \frac{\sqrt{(A_{9k}F_{5k} + A_{10k}F_{6k})^2 + (A_{9k}F_{6k} - A_{10k}F_{5k})^2}}{(2k-1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)}$ | $\delta_{53k} = \text{Arctg} \frac{A_{9k}F_{6k} - A_{10k}F_{5k}}{A_{9k}F_{5k} + A_{10k}F_{6k}}$ |
| $i_{\beta r}$ | $T_{14} = \frac{\sqrt{(A_1B_7 + A_2B_8)^2 + (A_1B_8 - A_2B_7)^2}}{2(A_1^2 + A_2^2)}$ | $\delta_{14} = \text{Arctg} \frac{A_1B_8 - A_2B_7}{A_1B_7 + A_2B_8}$ |
| | $T_{24} = \frac{\sqrt{(A_3C_7 + A_4C_8)^2 + (A_3C_8 - A_4C_7)^2}}{2(A_3^2 + A_4^2)}$ | $\delta_{24} = \text{Arctg} \frac{A_3C_8 - A_4C_7}{A_3C_7 + A_4C_8}$ |
| | $T_{34} = \frac{\sqrt{(A_5D_7 + A_6D_8)^2 + (A_6D_7 - A_5D_8)^2}}{2(A_5^2 + A_6^2)}$ | $\delta_{34} = \text{Arctg} \frac{A_5D_7 + A_6D_8}{A_6D_7 - A_5D_8}$ |
| | $T_{44k} = \frac{\sqrt{(A_{7k}E_{7k} + A_{8k}E_{8k})^2 + (A_{7k}E_{8k} - A_{8k}E_{7k})^2}}{(2k-1)(A_{7k}^2 + A_{8k}^2)}$ | $\delta_{44k} = \text{Arctg} \frac{A_{7k}E_{8k} - A_{8k}E_{7k}}{A_{7k}E_{7k} + A_{8k}E_{8k}}$ |

| | |
|---|---|
| $T_{54k} = \frac{\sqrt{(A_{9k}F_{7k} + A_{10k}F_{8k})^2 + (A_{9k}F_{8k} - A_{10k}F_{7k})^2}}{(2k - 1)(A_{9k}^2 + A_{10k}^2)}$ | $\delta_{54k} = \text{Arctg} \frac{A_{9k}F_{8k} - A_{10k}F_{7k}}{A_{9k}F_{7k} + A_{10k}F_{8k}}$ |
|---|---|

Таблица 2.11

| A | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| $A_1=a_1+a_2\omega^2$ | $A_2=a_3+a_4\omega^2$ | $A_3=a_5+a_6\omega^2$ | $A_4=a_7+a_8\omega^2$ | $A_5=a_9+a_{10}\omega^2$ | $A_{10k}=a_{19k}+a_{20k}\omega^2$ |
| $A_6=a_{11}+a_{12}\omega^2$ | $A_{7k}=a_{13k}+a_{14k}\omega^2$ | $A_{8k}=a_{15k}+a_{16k}\omega^2$ | $A_{9k}=a_{17k}+a_{18k}\omega^2$ | | |
| | B | C | D | E | F |
| 1 | $B_1=b_1+b_2\omega^2$ | $C_1=c_1+c_2\omega^2$ | $D_1=d_1=0$ | $E_1=e_1=0$ | $F_1=f_1=0$ |
| 2 | $B_2=b_3+b_4\omega^2$ | $C_2=c_3+c_4\omega^2$ | $D_2=d_2\omega$ | $E_{2k}=e_{2k}\omega$ | $F_{2k}=f_{2k}\omega$ |
| 3 | $B_3=b_5=0$ | $C_3=c_5=0$ | $D_3=d_3+d_4\omega^2$ | $E_{3k}=e_{3k}+e_4\omega^2$ | $F_{3k}=f_{3k}+f_4\omega^2$ |
| 4 | $B_4=b_6\omega$ | $C_4=c_6\omega$ | $D_4=d_5+d_6\omega^2$ | $E_{4k}=e_{5k}+e_{6k}\omega^2$ | $F_{4k}=f_{5k}+f_{6k}\omega^2$ |
| 5 | $B_5=b_7+b_8\omega^2$ | $C_5=c_7+c_8\omega^2$ | $D_5=d_7\omega$ | $E_5=e_7\omega$ | $F_5=f_7\omega$ |
| 6 | $B_6=b_9+b_{10}\omega^2$ | $C_6=c_9+c_{10}\omega^2$ | $D_6=d_8\omega$ | $E_{6k}=e_{8k}\omega$ | $F_{6k}=f_{8k}\omega$ |
| 7 | $B_7=b_{11}\omega$ | $C_7=c_{11}\omega$ | $D_7=d_9+d_{10}\omega^2$ | $E_{7k}=e_{9k}+e_{10}\omega^2$ | $F_{7k}=f_{9k}+f_{10}\omega^2$ |
| 8 | $B_8=b_{12}\omega$ | $C_8=c_{12}\omega$ | $D_8=d_{11}+d_{12}\omega^2$ | $E_{8k}=e_{11k}+e_{12k}\omega^2$ | $F_{8k}=f_{11k}+f_{12k}\omega^2$ |

где значение величин $a_x, b_x, c_x, d_x, e_x, f_x$ приведены в приложении 2.

Разрешим пятое уравнение системы (2.1) при амплитудной модуляции питающих напряжений подобно тому, как это было сделано для случая фазовой модуляции.

Значения пусковых токов АД и их производный по ω при $\omega = 0$ приведены в табл. 2.12.

| | |
|----------------|---|
| | $i_{\alpha s}(t) _{\omega=0} = U_{m1} \left(T_{011} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{011}) + \right. \\ \left. + T_{021} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{021}) \right)$ |
| $i_{\alpha s}$ | $\left. \frac{di_{\alpha s}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m2} (T_{131} \sin(\omega_1 t + \delta_{131}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{141k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{141k}) + \right. \\ \left. + T_{151k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{151k}) \right))$ |
| | $i_{\beta s}(t) _{\omega=0} = U_{m2} (T_{032} \sin(\omega_1 t + \delta_{032}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{042k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{042k}) + \right. \\ \left. + T_{052k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{052k}) \right))$ |
| $i_{\beta s}$ | $\left. \frac{di_{\beta s}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m1} \left(T_{112} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{112}) + \right. \\ \left. + T_{122} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{122}) \right)$ |
| | $i_{\alpha r}(t) _{\omega=0} = U_{m1} \left(T_{013} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{013}) + \right. \\ \left. + T_{023} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{023}) \right)$ |
| $i_{\alpha r}$ | $\left. \frac{di_{\alpha r}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m2} (T_{133} \sin(\omega_1 t + \delta_{133}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{143k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{143k}) + \right. \\ \left. + T_{153k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{153k}) \right))$ |
| | $i_{\beta r}(t) _{\omega=0} = U_{m2} (T_{034} \sin(\omega_1 t + \delta_{034}) + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{044k} \sin(((2k-1)\Omega - \omega_1)t + \delta_{044k}) + \right. \\ \left. + T_{054k} \sin(((2k-1)\Omega + \omega_1)t + \delta_{054k}) \right))$ |
| $i_{\beta r}$ | $\left. \frac{di_{\beta r}(t, \omega)}{d\omega} \right _{\omega=0} = U_{m1} \left(T_{114} \sin((\omega_1 - \Omega)t + \delta_{114}) + \right. \\ \left. + T_{124} \sin((\omega_1 + \Omega)t + \delta_{124}) \right)$ |

Значения амплитуд и фаз гармонических составляющих токов представлены в табл. 2.13.

Таблица 2.13

| Ток | Амплитуды | Фазы |
|---------------|--|--|
| i_{as} | $T_{011} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b_1^2 + b_3^2}{a_1^2 + a_3^2}}$ | $\delta_{011} = \text{Arctg} \frac{a_1 b_3 - a_3 b_1}{a_1 b_1 + a_3 b_3}$ |
| | $T_{021} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c_1^2 + c_3^2}{a_5^2 + a_7^2}}$ | $\delta_{021} = \text{Arctg} \frac{a_5 c_3 - a_7 c_1}{a_5 c_1 + a_7 c_3}$ |
| | $T_{131} = \frac{d_2}{2(a_9^2 + a_{11}^2)}$ | $\delta_{131} = \text{Arctg} \frac{-a_9}{a_{11}}$ |
| | $T_{141k} = \frac{e_2}{(2k-1)(a_{13k}^2 + a_{15k}^2)}$ | $\delta_{141k} = \text{Arctg} \frac{-a_{13k}}{a_{15k}}$ |
| | $T_{151k} = \frac{f_2}{(2k-1)(a_{17k}^2 + a_{19k}^2)}$ | $\delta_{151k} = \text{Arctg} \frac{-a_{17k}}{a_{19k}}$ |
| $i_{\beta s}$ | $T_{032} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_3^2 + d_5^2}{a_9^2 + a_{11}^2}}$ | $\delta_{032} = \text{Arctg} \frac{a_9 d_3 + a_{11} d_5}{a_{11} d_3 - a_9 d_5}$ |
| | $T_{042k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{e_{3k}^2 + e_{5k}^2}{a_{13k}^2 + a_{15k}^2}}$ | $\delta_{042k} = \text{Arctg} \frac{a_{13k} e_{5k} - a_{15k} e_{3k}}{a_{13k} e_{3k} + a_{15k} e_{5k}}$ |
| | $T_{052k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{f_{3k}^2 + f_{5k}^2}{a_{17k}^2 + a_{19k}^2}}$ | $\delta_{052k} = \text{Arctg} \frac{a_{17k} f_{5k} - a_{19k} f_{3k}}{a_{17k} f_{3k} + a_{19k} f_{5k}}$ |
| | $T_{112} = \frac{1}{2} \frac{b_6}{a_1^2 + a_3^2}$ | $\delta_{112} = \text{Arctg} \frac{a_1}{a_3}$ |
| | $T_{122} = \frac{1}{2} \frac{c_6}{a_5^2 + a_7^2}$ | $\delta_{122} = \text{Arctg} \frac{a_5}{a_7}$ |
| i_{ar} | $T_{013} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b_7^2 + b_9^2}{a_1^2 + a_3^2}}$ | $\delta_{013} = \text{Arctg} \frac{a_1 b_9 - a_3 b_7}{a_1 b_7 + a_3 b_9}$ |
| | $T_{023} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c_7^2 + c_9^2}{a_5^2 + a_7^2}}$ | $\delta_{023} = \text{Arctg} \frac{a_5 c_9 - a_7 c_7}{a_5 c_7 + a_7 c_9}$ |
| | $T_{133} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_7^2 + d_9^2}{a_9^2 + a_{11}^2}}$ | $\delta_{133} = \text{Arctg} \frac{a_9 d_7 + a_{11} d_8}{a_{11} d_7 - a_9 d_8}$ |

| | | |
|---------------|---|--|
| | $T_{143k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{e_7^2 + e_{8k}^2}{a_{13k}^2 + a_{15k}^2}}$ | $\delta_{143k} = \text{Arctg} \frac{a_{13k} e_7 + a_{15k} e_{8k}}{a_{15k} e_7 - a_{13k} e_{8k}}$ |
| | $T_{153k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{f_7^2 + f_{8k}^2}{a_{17k}^2 + a_{19k}^2}}$ | $\delta_{153k} = \text{Arctg} \frac{a_{17k} f_7 + a_{19k} f_{8k}}{a_{19k} f_7 - a_{17k} f_{8k}}$ |
| $i_{\beta r}$ | $T_{034} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d_9^2 + d_{11}^2}{a_9^2 + a_{11}^2}}$ | $\delta_{034} = \text{Arctg} \frac{a_9 d_9 + a_{11} d_{11}}{a_{11} d_9 - a_9 d_{11}}$ |
| | $T_{044k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{e_{9k}^2 + e_{11k}^2}{a_{13k}^2 + a_{15k}^2}}$ | $\delta_{044k} = \text{Arctg} \frac{a_{13k} e_{11k} - a_{15k} e_{9k}}{a_{13k} e_{9k} + a_{15k} e_{11k}}$ |
| | $T_{054k} = \frac{1}{2k-1} \sqrt{\frac{f_{9k}^2 + f_{11k}^2}{a_{17k}^2 + a_{19k}^2}}$ | $\delta_{054k} = \text{Arctg} \frac{a_{17k} f_{11k} - a_{19k} f_{9k}}{a_{17k} f_{9k} + a_{19k} f_{11k}}$ |
| | $T_{114} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{b_{11}^2 + b_{12}^2}{a_1^2 + a_3^2}}$ | $\delta_{114} = \text{Arctg} \frac{a_1 b_{12} - a_3 b_{11}}{a_1 b_{11} + a_3 b_{12}}$ |
| | $T_{124} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c_{11}^2 + c_{12}^2}{a_5^2 + a_7^2}}$ | $\delta_{124} = \text{Arctg} \frac{a_5 c_{12} - a_7 c_{11}}{a_5 c_{11} + a_7 c_{12}}$ |

С учётом табл. 2.13, пренебрегая составляющими пускового момента с частотами, намного превосходящими Ω в связи с незначительностью их влияния на закон движения, запишем выражение для пускового момента:

$$M_{\Pi}(t) = N_1 \sin(\Omega t + \varphi_1) + \sum_{k=1}^{\infty} N_{2k} \sin(2k\Omega t + \varphi_{2k}) + N_{3k} \sin((2k-2)\Omega t + \varphi_{3k}), \quad (2.10)$$

где

$$N_1 = \sqrt{N_{11}^2 + N_{12}^2 + 2N_{11}N_{12} \cos(\varphi_{11} - \varphi_{12})};$$

$$\varphi_1 = \text{Arctg} \left(\frac{N_{11} \sin \varphi_{11} + N_{12} \sin \varphi_{12}}{N_{11} \cos \varphi_{11} + N_{12} \cos \varphi_{12}} \right);$$

$$N_{2k} = \sqrt{N_{21k}^2 + N_{22k}^2 + 2N_{21k}N_{22k} \cos(\varphi_{21k} - \varphi_{22k})};$$

$$\varphi_{2k} = \text{Arctg}\left(\frac{N_{21k} \sin \varphi_{21k} + N_{22k} \sin \varphi_{22k}}{N_{21k} \cos \varphi_{21k} + N_{22k} \cos \varphi_{22k}}\right);$$

$$N_{3k} = \sqrt{N_{31k}^2 + N_{32k}^2 + 2N_{31k}N_{32k} \cos(\varphi_{31k} - \varphi_{32k})};$$

$$\varphi_{3k} = \text{Arctg}\left(\frac{N_{31k} \sin \varphi_{31k} + N_{32k} \sin \varphi_{32k}}{N_{31k} \cos \varphi_{31k} + N_{32k} \cos \varphi_{32k}}\right);$$

$$N_{11} = \frac{k_D M_\alpha U_{m1} U_{m2} T_{034}}{2} \sqrt{T_{011}^2 + T_{021}^2 + 2T_{011}T_{021} \cos(2\delta_{034} - \delta_{011} - \delta_{021})};$$

$$N_{12} = \frac{k_D M_\beta U_{m1} U_{m2} T_{032}}{2} \sqrt{T_{013}^2 + T_{023}^2 + 2T_{013}T_{023} \cos(2\delta_{032} - \delta_{013} - \delta_{023})};$$

$$\varphi_{11} = \text{Arctg}\left(\frac{T_{011} \sin(\delta_{034} - \delta_{011}) + T_{021} \sin(\delta_{021} - \delta_{034})}{T_{011} \cos(\delta_{034} - \delta_{011}) + T_{021} \cos(\delta_{021} - \delta_{034})}\right) + \frac{\pi}{2};$$

$$\varphi_{12} = \text{Arctg}\left(\frac{-(T_{013} \sin(\delta_{032} - \delta_{013}) + T_{023} \sin(\delta_{023} - \delta_{032}))}{-(T_{013} \cos(\delta_{032} - \delta_{013}) + T_{023} \cos(\delta_{023} - \delta_{032}))}\right) + \frac{\pi}{2};$$

$$N_{21k} =$$

$$= \frac{k_D M_\alpha U_{m1} U_{m2}}{2\pi} \sqrt{\begin{matrix} T_{011}^2 T_{054k}^2 + T_{021}^2 T_{044k}^2 - \\ -2T_{011}T_{021}T_{044k}T_{054k} \cos(\delta_{011} + \delta_{021} + \delta_{044k} - \delta_{054k}) \end{matrix}};$$

$$N_{22k} =$$

$$= \frac{k_D M_\beta U_{m1} U_{m2}}{2\pi} \sqrt{\begin{matrix} T_{013}^2 T_{052k}^2 + T_{023}^2 T_{042k}^2 - \\ -2T_{013}T_{023}T_{042k}T_{052k} \cos(\delta_{013} + \delta_{023} + \delta_{042k} - \delta_{052k}) \end{matrix}};$$

$$\varphi_{21k} =$$

$$= \text{Arctg}\left(\frac{T_{011}T_{054k} \sin(\delta_{054k} - \delta_{011}) - T_{021}T_{044k} \sin(\delta_{021} + \delta_{044k})}{T_{011}T_{054k} \cos(\delta_{054k} - \delta_{011}) - T_{021}T_{044k} \cos(\delta_{021} + \delta_{044k})}\right) + \frac{\pi}{2};$$

$$\varphi_{22k} =$$

$$= \text{Arctg}\left(\frac{T_{023}T_{042k} \sin(\delta_{023} + \delta_{042k}) - T_{013}T_{052k} \sin(\delta_{052k} - \delta_{013})}{T_{023}T_{042k} \cos(\delta_{023} + \delta_{042k}) - T_{013}T_{052k} \cos(\delta_{052k} - \delta_{013})}\right) + \frac{\pi}{2};$$

$$N_{31k} =$$

$$= \frac{k_D M_\alpha U_{m1} U_{m2}}{2\pi} \sqrt{\begin{matrix} T_{011}^2 T_{044k}^2 + T_{021}^2 T_{054k}^2 - \\ -2T_{011}T_{021}T_{044k}T_{054k} \cos(\delta_{011} + \delta_{021} + \delta_{044k} - \delta_{054k}) \end{matrix}};$$

$$N_{32k} = \frac{k_d M_\beta U_{m1} U_{m2}}{2\pi} \sqrt{T_{013}^2 T_{042k}^2 + T_{023}^2 T_{052k}^2 - 2T_{013} T_{023} T_{042k} T_{052k} \cos(\delta_{013} + \delta_{023} + \delta_{042k} - \delta_{052k})} ;$$

$$\varphi_{31k} = \text{Arctg} \left(\frac{T_{021} T_{054k} \sin(\delta_{054k} - \delta_{021}) - T_{011} T_{044k} \sin(\delta_{011} + \delta_{044k})}{T_{021} T_{054k} \cos(\delta_{054k} - \delta_{021}) - T_{011} T_{044k} \cos(\delta_{011} + \delta_{044k})} \right) + \frac{\pi}{2} ;$$

$$\varphi_{32k} = \text{Arctg} \left(\frac{T_{013} T_{042k} \sin(\delta_{013} + \delta_{042k}) - T_{023} T_{052k} \sin(\delta_{052k} - \delta_{023})}{T_{013} T_{042k} \cos(\delta_{013} + \delta_{042k}) - T_{023} T_{052k} \cos(\delta_{052k} - \delta_{023})} \right) + \frac{\pi}{2} .$$

Коэффициент электромагнитного демпфирования найдём с учётом полученных ранее токов и их производных по ω , подставив их в выражение (2.4), аналогично тому, как это было сделано для случая фазовой модуляции:

$$F_{\text{демп}} = k_d \begin{pmatrix} M_\alpha \left(\begin{array}{l} \frac{U_{m2}^2 T_{034} T_{131}}{2} \cos(\delta_{131} - \delta_{034}) + \\ \frac{U_{m1}^2 T_{011} T_{114}}{2} \cos(\delta_{011} - \delta_{114}) + \\ \frac{U_{m1}^2 T_{021} T_{124}}{2} \cos(\delta_{021} - \delta_{124}) \end{array} \right) - \\ -M_\beta \left(\begin{array}{l} \frac{U_{m1}^2 T_{013} T_{112}}{2} \cos(\delta_{112} - \delta_{013}) + \\ \frac{U_{m1}^2 T_{023} T_{122}}{2} \cos(\delta_{122} - \delta_{023}) + \\ \frac{U_{m2}^2 T_{032} T_{133}}{2} \cos(\delta_{032} - \delta_{133}) \end{array} \right) \end{pmatrix} .$$

Зависимость перемещения от времени будем искать методом гармонического [58] баланса в виде, подобном правой части (2.10)

$$\chi(t) = \chi_1 \sin(\Omega t + \alpha_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \chi_{2k} \sin(2k\Omega t + \alpha_{2k}) + \chi_{3k} \sin((2k-2)\Omega t + \alpha_{3k}) . \quad (2.11)$$

Подставляя выражение для нахождения перемещения в пятое уравнение системы, найдём амплитуды и фазы пульсаций.

$$\chi_1 = \sqrt{\chi_{11}^2 + \chi_{12}^2} ;$$

$$\begin{aligned} \chi_{2k} &= \sqrt{\chi_{21k}^2 + \chi_{22k}^2} ; \\ \chi_{3k} &= \sqrt{\chi_{31k}^2 + \chi_{32k}^2} ; \\ \chi_{11} &= \frac{N_{11}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2) - N_{12}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2\Omega^2} ; \\ \chi_{12} &= \frac{N_{12}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2) + N_{11}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2\Omega^2} ; \\ \chi_{21k} &= \frac{N_{21k}(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2) - 2N_{22k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})k\Omega}{(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2)^2 + 4(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2k^2\Omega^2} ; \\ \chi_{22k} &= \frac{N_{22k}(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2) + 2N_{21k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})k\Omega}{(C_{\text{мех}} - 4L_{\text{мех}}k^2\Omega^2)^2 + 4(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2k^2\Omega^2} ; \\ \chi_{31k} &= \frac{N_{31k}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2) - N_{32k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})(2k-2)\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2(2k-2)^2\Omega^2} ; \\ \chi_{32k} &= \frac{N_{32k}(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2) + N_{31k}(R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})(2k-2)\Omega}{(C_{\text{мех}} - L_{\text{мех}}(2k-2)^2\Omega^2)^2 + (R_{\text{мех}} - F_{\text{демп}})^2(2k-2)^2\Omega^2} , \end{aligned}$$

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

Здесь

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

Полученные выражения составляют теоретическую основу для определения энергетических характеристик АД при работе его в пульсирующем режиме за счёт амплитудной модуляции питающих напряжений.

Проверим в программной среде MATLAB [19] методику расчёта и правильность полученных соотношений подобно тому, как это было сделано для случая фазовой модуляции питающих напряжений (рис. 2.3 и 2.4).

Параметры исполнительного двигателя АИР71А2 представлены в таблице 2.7.

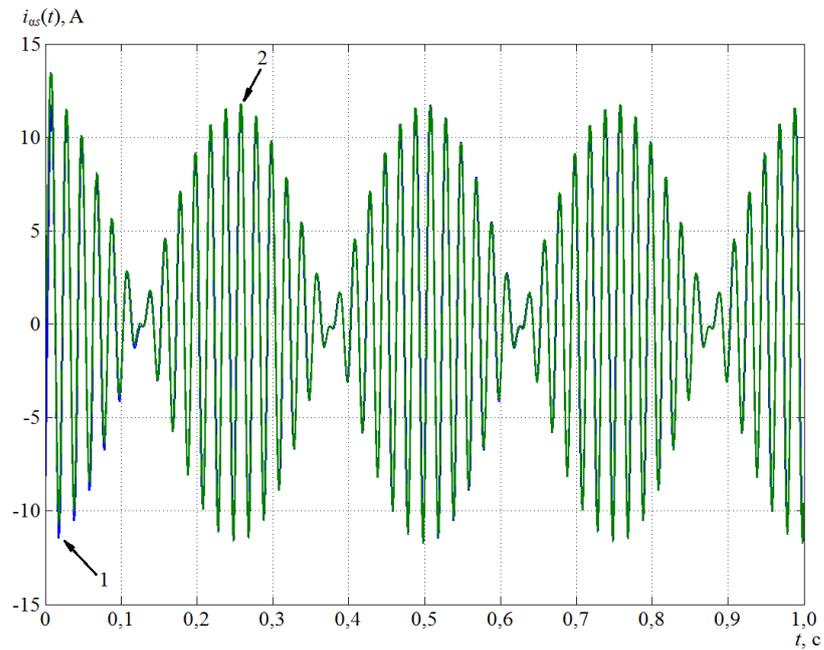


Рис. 2.3. Ток фазы $i_{os}(t)$ асинхронного двигателя: 1 – результаты аналитического расчёта; 2 – результаты математического моделирования

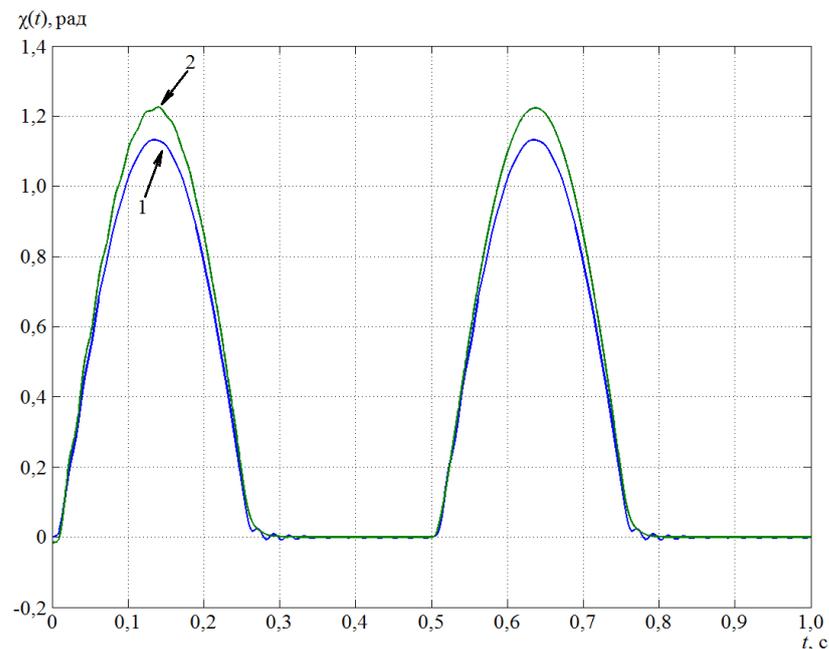


Рис. 2.4. Законы изменения координаты подвижного элемента привода $\chi(t)$: 1 – результаты аналитического расчёта; 2 – результаты математического моделирования

Как видно из рис. 2.3, результаты аналитического расчёта (кривая 1) мало отличаются от результатов математического моделирования (кривая 2). На рис. 2.4 представлен закон изменения координаты положения подвижного

элемента привода $\chi(t)$. Здесь расхождение расчётных данных (кривая 1) и результатов математического моделирования (кривая 2) не превышает 8 %.

Уравнения (2.6), (2.8) и (2.11) позволяют на первом этапе рассчитать выходные параметры электропривода при различных видах потенциальной модуляции фазных напряжений.

2.2. Энергетические соотношения в асинхронном двигателе при потенциальных видах модуляции

Фазовая модуляция

Электрическая активная мощность при фазовой модуляции с учетом выражения (2.3) может быть найдена как:

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

$$= \frac{1}{T} \left(F_{\alpha s} \left(T/2 \right) - F_{\alpha s}(0) + F_{\beta s}(T) - F_{\beta s}(0) \right),$$

где $F_{\alpha s}(0)$, $F_{\beta s}(0)$ – первообразные подынтегральных выражений для вычисления потребляемой активной мощности по осям α и β соответственно.

$$F_{\alpha s}(t) = \frac{U_{m1}^2 T_{11}}{2} \left(\sin(\delta_{11}) t - \frac{\cos(2\omega_1 t + \delta_{11})}{2\omega_1} \right) -$$

$$- \frac{U_{m1}^2}{2\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{21k} \left(\frac{\cos \left(((2k-1)\Omega - 2\omega_1)t + \delta_{21k} \right)}{(2k-1)\Omega - 2\omega_1} + \frac{\cos \left((2k-1)\Omega t + \delta_{21k} \right)}{(2k-1)\Omega} \right) + \right.$$

$$\left. + T_{31k} \left(\frac{\cos \left((2k-1)\Omega t + \delta_{31k} \right)}{(2k-1)\Omega} + \frac{\cos \left(((2k-1)\Omega + 2\omega_1)t + \delta_{31k} \right)}{(2k-1)\Omega + 2\omega_1} \right) \right) +$$

$$+ \frac{U_{m1} U_{m2} T_{41}}{2} \left(\frac{\cos(\Omega t - \gamma - \delta_{41})}{\Omega} + \frac{\cos((\omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \delta_{41})}{\omega_1 + \omega_2} \right);$$

$$\begin{aligned}
F_{\beta s}(t) = & \frac{U_{m1}U_{m2}T_{12}}{2} \left(\frac{\sin(\Omega t - \gamma + \delta_{12})}{\Omega} - \frac{\sin((\omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \delta_{12})}{\omega_1 + \omega_2} \right) + \\
& + \frac{U_{m1}U_{m2}}{2\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{aligned} & T_{22k} \left(\frac{\sin(((2k-1)\Omega - \omega_1 - \omega_2)t - \gamma + \delta_{22k})}{(2k-1)\Omega - \omega_1 - \omega_2} - \right. \\ & \left. - \frac{\sin((2k-2)\Omega t + \gamma + \delta_{22k})}{(2k-2)\Omega} \right) + \\ & + T_{32k} \left(\frac{\sin(2k\Omega t - \gamma + \delta_{32k})}{2k\Omega} - \right. \\ & \left. - \frac{\sin(((2k-1)\Omega + \omega_1 + \omega_2)t + \gamma + \delta_{32k})}{(2k-1)\Omega + \omega_1 + \omega_2} \right) \end{aligned} \right) + \\
& + \frac{U_{m2}^2 T_{42}}{2} \left(\cos(\delta_{42}) t - \frac{\sin(2\omega_2 t + 2\gamma + \delta_{42})}{2\omega_2} \right) .
\end{aligned}$$

Полная механическая мощность периодического движения может быть определена как:

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

где P_2 и Q_2 – активная и реактивная составляющая механической мощности соответственно.

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 электромагнитного момента и скорости соответственно; $\varphi_k - \alpha_k$ – угол сдвига фаз между электромагнитным моментом и скоростью.

Закон изменения скорости от времени:

$$\omega(t) = \dot{\chi}_0(t) = \omega_{1m} \cos(\Omega t + \alpha_1) + \quad (2.12)$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \omega_{2km} \cos((2k-2)\Omega t + \alpha_{2k}) + \omega_{3km} \cos(2k\Omega t + \alpha_{3k}),$$

где $\omega_{1m} = \chi_1 \Omega$, $\omega_{2km} = \chi_{2k} (2k-2)\Omega$, $\omega_{3km} = 2\chi_{3k} k\Omega$ – амплитуды составляющих скорости.

$$P_2 = \frac{1}{2} (N_1 \omega_{1m} \sin(\varphi_1 - \alpha_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} N_{2k} \omega_{2km} \sin(\varphi_{2k} - \alpha_{2k}) + \\ + N_{3k} \omega_{3km} \sin(\varphi_{3k} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{2(k+1)} \omega_{3km} \sin(\varphi_{2(k+1)} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{3k} \omega_{2(k+1)m} \sin(\varphi_{3k} - \alpha_{2(k+1)}) \end{array} \right));$$

$$Q_2 = -\frac{1}{2} (N_1 \omega_{1m} \cos(\varphi_1 - \alpha_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} N_{2k} \omega_{2km} \cos(\varphi_{2k} - \alpha_{2k}) + \\ + N_{3k} \omega_{3km} \cos(\varphi_{3k} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{2(k+1)} \omega_{3km} \cos(\varphi_{2(k+1)} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{3k} \omega_{2(k+1)m} \cos(\varphi_{3k} - \alpha_{2(k+1)}) \end{array} \right)).$$

КПД найдём как отношение полной механической мощности к активной составляющей электрической мощности:

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

Рассмотрим энергетические характеристики в частном случае фазовой модуляции питающих напряжений, при котором одна из обмоток подключается к источнику постоянного напряжения, а вторая питается от источника пульсирующего напряжения.

Активная составляющая электрической мощности:

$$P_1 = \frac{1}{T} \left(F_{\alpha s} \left(\frac{T}{2} \right) - F_{\alpha s}(0) + F_{\beta s}(T) - F_{\beta s}(0) \right).$$

Первообразные подынтегральных выражений для вычисления активной мощности по осям:

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

$$F_{\beta s}(t) = U_{m1} U_{m2} T_{12} \sin(\delta_{12}) t - \\ - \frac{U_{m1} U_{m2}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{22k} \frac{\cos((2k-1)\Omega t + \delta_{22k})}{(2k-1)\Omega} + \right. \\ \left. + T_{32k} \frac{\cos((2k-1)\Omega t + \delta_{32k})}{(2k-1)\Omega} \right) + \\ + U_{m2}^2 T_{42} \sin(\gamma + \delta_{42}) t .$$

Механическая мощность:

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

Активная составляющая механической мощности:

$$P_2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} N_{2k} \omega_{2km} \sin(\varphi_{2k} - \alpha_{2k}) .$$

Реактивная составляющая механической мощности:

$$Q_2 = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} N_{2k} \omega_{2km} \cos(\varphi_{2k} - \alpha_{2k}) .$$

Амплитудная модуляция

Аналогично со случаем фазовой модуляции с учетом выражения (2.9) определим активную составляющую электрической мощности при амплитудной модуляции:

$$P_1 = \frac{1}{T} \int_0^T U_{\alpha s}(t) i_{\alpha s}(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T U_{\beta s}(t) i_{\beta s}(t) dt = \\ = \frac{1}{T} \left(F_{\alpha s} \left(\frac{T}{2} \right) - F_{\alpha s}(0) + F_{\beta s}(T) - F_{\beta s}(0) \right) ,$$

$$\begin{aligned}
F_{\alpha s}(t) = & \frac{U_{m1}^2}{4} \left(T_{11} \left(\cos(\delta_{11}) t - \frac{\sin(2(\omega_1 - \Omega)t + \delta_{11})}{2(\omega_1 - \Omega)} \right) + \right. \\
& \left. + T_{21} \left(\frac{\sin(2\Omega t + \delta_{21})}{2\Omega} - \frac{\sin(2\omega_1 t + \delta_{21})}{2\omega_1} \right) \right) + \\
& + \frac{U_{m1}U_{m2}}{4} \left(T_{31} \left(\frac{\sin(\Omega t + \delta_{31})}{\Omega} - \frac{\sin((2\omega_1 - \Omega)t + \delta_{31})}{2\omega_1 - \Omega} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{41k} \left(\frac{\sin((2k\Omega - 2\omega_1)t + \delta_{41k})}{2k\Omega - 2\omega_1} - \frac{\sin((2k - 2)\Omega t + \delta_{41k})}{(2k - 2)\Omega} \right) + \right. \\
& \left. + T_{51k} \left(\frac{\sin(2k\Omega t + \delta_{51k})}{2k\Omega} - \frac{\sin(((2k - 2)\Omega + 2\omega_1)t + \delta_{51k})}{(2k - 2)\Omega + 2\omega_1} \right) \right) \right) + \\
& + \frac{U_{m1}^2}{4} \left(T_{11} \left(\frac{\sin(2\Omega t - \delta_{11})}{2\Omega} - \frac{\sin(2\omega_1 t + \delta_{11})}{2\omega_1} \right) + \right. \\
& \left. + T_{21} \left(\cos(\delta_{21}) t - \frac{\sin(2(\omega_1 + \Omega)t + \delta_{21})}{2(\omega_1 + \Omega)} \right) \right) + \\
& + \frac{U_{m1}U_{m2}}{4} \left(T_{31} \left(\frac{\sin(\Omega t - \delta_{31})}{\Omega} - \frac{\sin((2\omega_1 + \Omega)t + \delta_{31})}{2\omega_1 + \Omega} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{41k} \left(\frac{\sin(((2k - 2)\Omega - 2\omega_1)t + \delta_{41k})}{(2k - 2)\Omega - 2\omega_1} - \frac{\sin(2k\Omega t + \delta_{41k})}{2k\Omega} \right) + \right. \\
& \left. + T_{51k} \left(\frac{\sin((2k - 2)\Omega t + \delta_{51k})}{(2k - 2)\Omega} - \frac{\sin((2k\Omega + 2\omega_1)t + \delta_{51k})}{2k\Omega + 2\omega_1} \right) \right) \right) ;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{\beta s}(t) = & \frac{U_{m1}U_{m2}}{2} \left(T_{12} \left(\frac{\cos(\Omega t - \delta_{12})}{\Omega} - \frac{\cos((2\omega_1 - \Omega)t + \delta_{12})}{2\omega_1 - \Omega} \right) - \right. \\
& \left. - T_{22} \left(\frac{\cos(\Omega t + \delta_{22})}{\Omega} + \frac{\cos((2\omega_1 + \Omega)t + \delta_{22})}{2\omega_1 + \Omega} \right) \right) + \\
& + \frac{U_{m2}^2}{2} \left(T_{32} \left(\sin(\delta_{32}) t - \frac{\cos(2\omega_1 t + \delta_{32})}{2\omega_1} \right) - \right. \\
& \left. - \frac{1}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \left(T_{42k} \left(\frac{\cos(((2k-1)\Omega - 2\omega_1)t + \delta_{42k})}{(2k-1)\Omega - 2\omega_1} + \frac{\cos((2k-1)\Omega t + \delta_{42k})}{(2k-1)\Omega} \right) + \right. \right. \\
& \left. \left. + T_{52k} \left(\frac{\cos((2k-1)\Omega t + \delta_{52k})}{(2k-1)\Omega} + \frac{\cos(((2k-1)\Omega + 2\omega_1)t + \delta_{52k})}{(2k-1)\Omega + 2\omega_1} \right) \right) \right) .
\end{aligned}$$

Механическая мощность при амплитудной модуляции:

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

Активная составляющая мощности:

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

Реактивная составляющая мощности:

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

Закон изменения скорости:

$$\begin{aligned}
\omega(t) = \chi_0'(t) = & \omega_{1m} \cos(\Omega t + \alpha_1) + \\
& + \sum_{k=1}^{\infty} \omega_{2km} \cos(2k\Omega t + \alpha_{3k}) + \omega_{3km} \cos((2k-2)\Omega t + \alpha_{2k}) , \quad (2.13)
\end{aligned}$$

где $\omega_{1m} = \chi_1 \Omega$, $\omega_{2km} = \chi_{2k} 2k\Omega$, $\omega_{3km} = \chi_{3k} (2k-2)\Omega$ – амплитуды составляющих скорости.

$$P_2 = \frac{1}{2} (N_1 \omega_{1m} \sin(\varphi_1 - \alpha_1) +$$

$$Q_2 = -\frac{1}{2}(N_1\omega_{1m} \cos(\varphi_1 - \alpha_1) + \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} N_{2k}\omega_{2km} \sin(\varphi_{2k} - \alpha_{2k}) + \\ + N_{3k}\omega_{3km} \sin(\varphi_{3k} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{2(k+1)}\omega_{3km} \sin(\varphi_{2(k+1)} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{3k}\omega_{2(k+1)m} \sin(\varphi_{3k} - \alpha_{2(k+1)}) \end{array} \right) ;$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{array}{l} N_{2k}\omega_{2km} \cos(\varphi_{2k} - \alpha_{2k}) + \\ + N_{3k}\omega_{3km} \cos(\varphi_{3k} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{2(k+1)}\omega_{3km} \cos(\varphi_{2(k+1)} - \alpha_{3k}) + \\ + N_{3k}\omega_{2(k+1)m} \cos(\varphi_{3k} - \alpha_{2(k+1)}) \end{array} \right) .$$

КПД найдём как отношение полной механической мощности к активной составляющей электрической мощности:

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

На рис. 2.5 представлены зависимости полной механической мощности электропривода пульсирующего движения для режимов ФМ и АМ, рассчитанные по выражениям (2.7), (2.10), (2.12) и (2.13). Из рис. 2.5 видно, что во время паузы механическая мощность равна нулю.

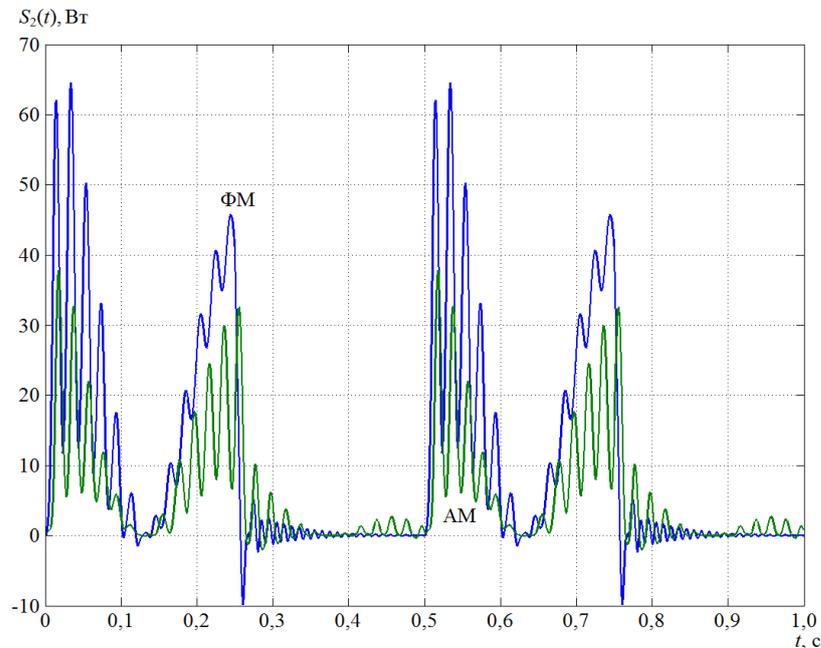


Рис. 2.5. Полная механическая мощность в режимах ФМ и АМ

Полученные выражения составляют основу программного обеспечения для расчёта и исследования энергетических характеристик электроприводов,

работающих в режиме пульсирующего движения, а также могут быть рекомендованы к применению при их разработке и анализе.

2.3. Выводы

1. Установлена неизвестная ранее аналитическая связь 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. Разработана методика определения выходных параметров электропривода с пульсирующим законом движения при потенциальной фазовой и амплитудной модуляции.
3. На основании полученной методики разработано программное обеспечение для среды MATLAB, позволяющее анализировать выходные энергетические характеристики электропривода с пульсирующим законом движения при потенциально фазовой и амплитудной модуляциях. Исходные коды программ представлены в приложении 5.
4. В электроприводе пульсирующего движения полезная работа совершается как активной, так и реактивной составляющей механической мощности.

III. Разработка преобразователей напряжения для электропривода с пульсирующим законом движения с улучшенными динамическими характеристиками

В настоящем разделе рассматриваются теоретические основы построения импульсных преобразователей напряжения с улучшенными динамическими характеристиками для электропривода с пульсирующим законом движения, в случае реализации его за счет потенциальной фазовой модуляции при питании обмоток АД постоянным и пульсирующим напряжением с частотой Ω .

В качестве источника питания постоянного тока для питания АД был выбран отработанный и применяемый в АО «НПЦ «Полюс» импульсный преобразователь понижающего типа с выходным напряжением 25 – 30 В.

3.1. Способы управления преобразователем напряжения

Традиционно схема управления импульсным преобразователем напряжения выполнялась с применением только аналоговых компонентов. Однако при современных требованиях к точности и многофункциональности аналоговая система получается громоздкой, многоэлементной и занимающей много места на плате. Некоторые задачи, как например, обеспечение интерфейса, решаются достаточно сложно. Развитие современных микроконтроллеров и цифровых сигнальных процессоров, расширение их возможностей при постоянном снижении стоимости привело к необходимости построения систем, использующих частично или полностью цифровые методы управления.

Каждый из преобразователей напряжения (ПН) включает в себя, кроме силовой части, схему управления. Удовлетворение современных требований к системам электропитания по энергетическим параметрам невозможно без организации сложных алгоритмов контроля и управления режимами работы используемых источников энергии. Кроме того, разработчик сталкивается с необходимостью решения разнообразных задач, связанных с управлением

силовыми преобразователями по определённому алгоритму. Учитывая, что в схемах управления силовыми преобразующими устройствами, как правило, используются элементы аналоговой техники, реализация сложного закона управления требует значительных аппаратных затрат.

Обеспечить функционирование ПН по заданному алгоритму целесообразно на элементах цифровой техники с использованием встроенных программ. В последнее время разработчику электронной аппаратуры стали доступны самые разнообразные микроконтроллеры, в том числе отвечающие жёстким требованиям эксплуатации космической техники.

Одной из основных особенностей цифровой системы управления является её адаптивность, возможность изменения характера работы в зависимости от влияния внешних факторов или необходимости, без переструктурирования изменить полностью или частично режим работы управляемых узлов.

Наиболее распространённым и легко реализуемым, на практике, алгоритмом является пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) алгоритм цифрового регулятора (рис. 3.1). При использовании ПИД-регулятора [82, 114] управление преобразователем осуществляется согласно выражению:

$$u(n) = K_p E(n) + K_i \sum_{k=0}^n E(k) + K_d \frac{E(n) - E(n-1)}{T} = \quad (3.1)$$

$$= P + I + D ;$$

где $u(n)$ – коэффициент заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ) 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.

При включении питания происходит инициализация микроконтроллера системы управления (рис. 3.1). После небольшой паузы начинает работать алгоритм плавного запуска, который не позволяет развиваться большому току заряда конденсаторов фильтра. Затем программа входит в основной цикл.

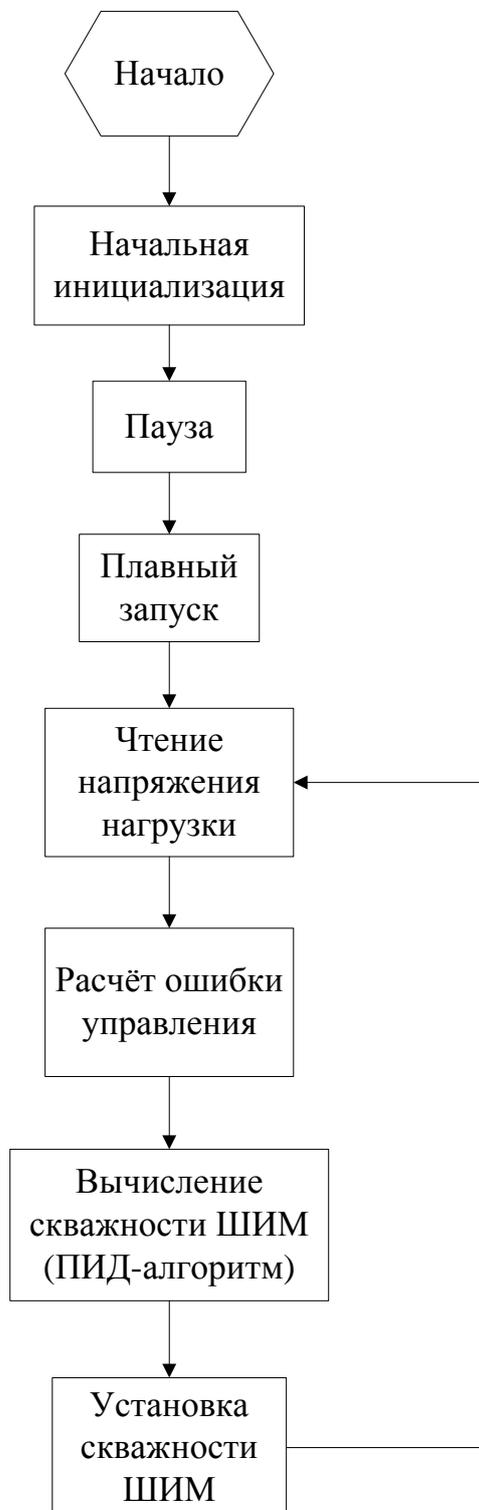


Рис. 3.1. Алгоритм цифрового ПИД-регулятора для управления преобразователем напряжения

Основной цикл начинается со считывания напряжения нагрузки при помощи встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера. Далее вычисляется ошибка управления, скажность ШИМ (согласно выражению (3.1)) и происходит установка нового коэффициента заполнения ШИМ. Затем цикл повторяется.

Одним из недостатков описанного выше подхода к управлению силовым преобразователем является то, что при этом не учитываются возмущающие воздействия на ПН: ток дросселя и ток нагрузки. Фактически регулятор начинает работать только тогда, когда появилась разница между выходным и опорным напряжением, что негативно сказывается на динамике.

Задача разработки систем управления с максимальным быстродействием можно решить с помощью принципа максимума Понтрягина [99, 110]. Тем не менее, непосредственное применение этого принципа сталкивается с серьезными трудностями, связанными с преобразованием вектора оптимального управления как функции вектора количества движения в вектор управления как функцию вектора состояния или времени [73].

В силовой преобразовательной технике достаточно сильно упростить задачу позволяет использование уравнения баланса между текущим значением внутренней (запасённой системой) энергии и её значением в установившемся режиме [72]. В соответствии с принципом наименьшего действия алгоритм управления, обеспечивающий минимум интеграла по времени от уравнения баланса, обеспечивает и минимальное время переходного процесса.

На рис. 3.2 представлен алгоритм управления ПН по балансу необходимой и накопленной энергии [72]. Здесь моменты открытия и закрытия ключа определяются согласно уравнению баланса между необходимой фильтру ПН энергии, для достижения равенства $U_n = U_{оп}$ и накопленной на данный момент энергией. Так как выражение энергетического баланса содержит индуктивность дросселя, то алгоритм

управления ПН вычисляет реальное значение индуктивности фильтра и использует его в уравнении энергетического баланса.

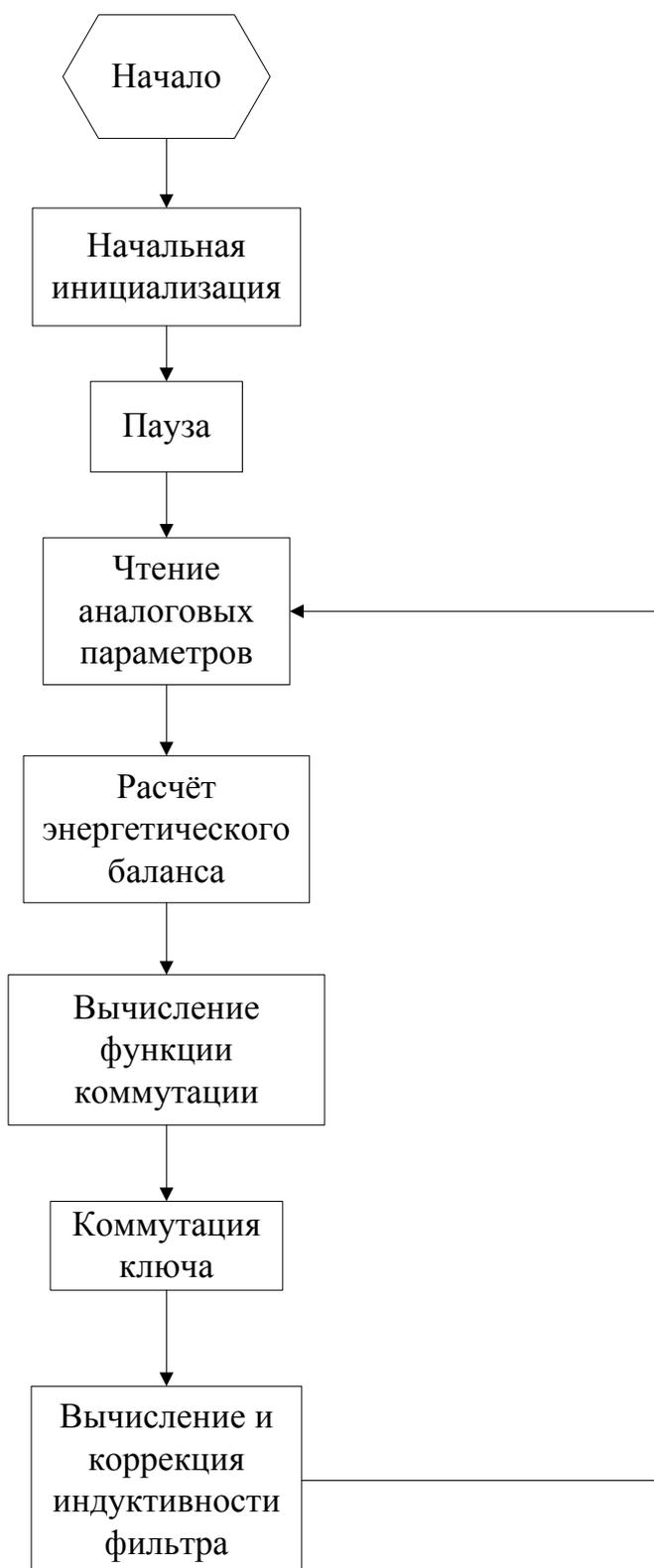


Рис. 3.2. Алгоритм управления преобразователем напряжения по балансу необходимой и накопленной энергии

На рис. 3.3 представлен алгоритм управления ПН по балансу необходимой и накопленной энергии с ШИМ. В отличие от релейного

алгоритма управления по балансу энергии, здесь для определения времени переключения ключа ШИМ значение текущего энергетического баланса сравнивается с пилообразным сигналом ШИМ [73].

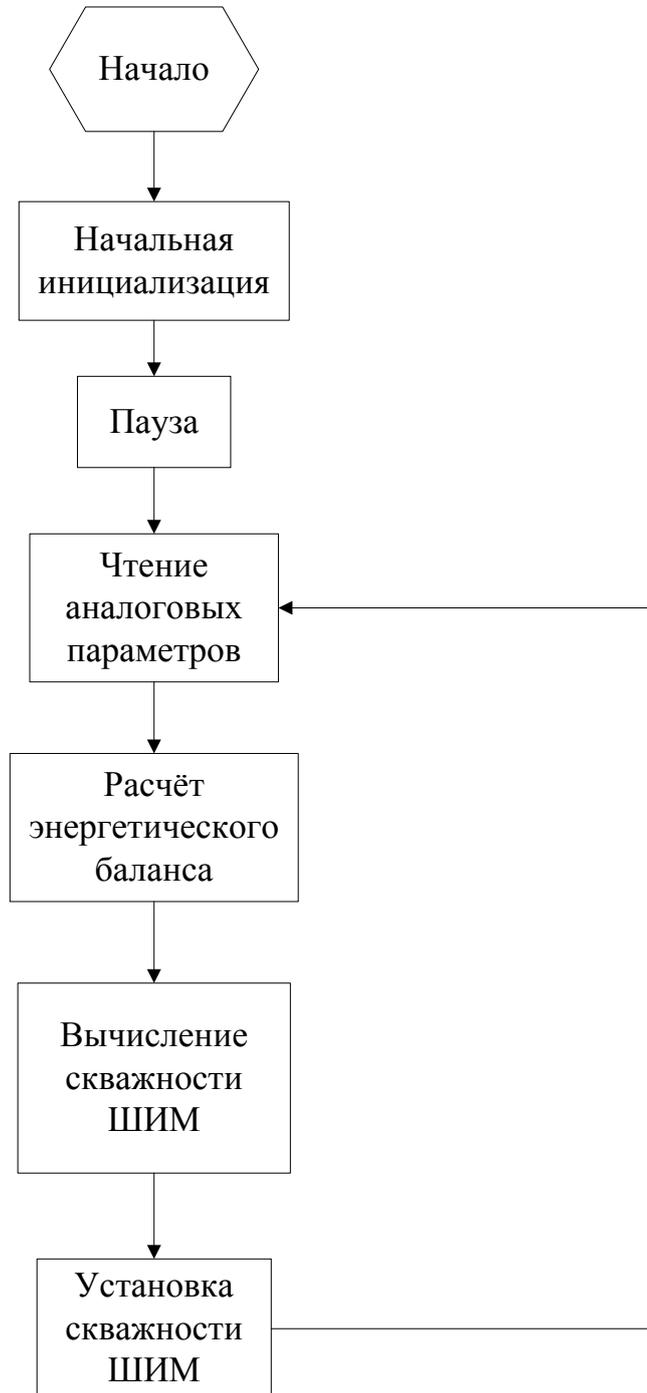


Рис. 3.3. Алгоритм управления преобразователем напряжения по балансу необходимой и накопленной энергии с ШИМ

Ввиду того, что применение ШИМ накладывает ограничения на моменты открывания и закрывания ключа, динамические характеристики ПН уступают динамическим характеристикам того же ПН управляемого по

релейному алгоритму. Но, при этом, так как частота следования импульсов при ШИМ остаётся постоянной в течение времени работы, характеристики электромагнитной совместимости лучше у ПН, управляемого по алгоритму баланса необходимой и накопленной энергии с ШИМ. Синхронизация ПН для организации параллельной работы реализуется одинаково легко при обоих алгоритмах управления.

3.2. Математическое описание преобразователя напряжения

Реализацию управления по балансу необходимой и накопленной энергии рассмотрим на примере ПН, представленном на рис. 3.4, в котором текущее значение накопленной LC-фильтром энергии можно определить как:

$$W = \frac{C}{2} U_{\text{н}}^2(t) + \frac{L}{2} (i_L(t) - i_{\text{н}}(t))^2 \text{sign}(i_L(t) - i_{\text{н}}(t)), \quad (3.2)$$

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

Пусть 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 [73]. Тогда, преобразовав уравнение (3.2) закон управления можно представить в виде

$$F_{\text{з}} = (U_{\text{н}}^2(t) - U_{\text{оп}}^2) + \rho^2 (i_L(t) - i_{\text{н}}(t))^2 \text{sign}(i_L(t) - i_{\text{н}}(t));$$

$$F_{\text{к}} = \begin{cases} 1 & \text{при } F_{\text{з}} < 0; \\ 0 & \text{при } F_{\text{з}} > 0, \end{cases} \quad (3.3)$$

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

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

При работе ПН система управления собирает информацию о текущем токе нагрузки (i_n), токе дросселя (i_L) и напряжении нагрузки (U_n). В соответствии с уравнением (3.3) вычисляет энергетический баланс и в момент времени, когда энергетический баланс становится равным нулю выдаёт сигнал управления F_y на драйвер. Драйвер, в свою очередь, управляет транзистором VT при помощи сигнала F_k . Сигнал синхронизации F_c служит для организации параллельной работы ПН (если требуется).

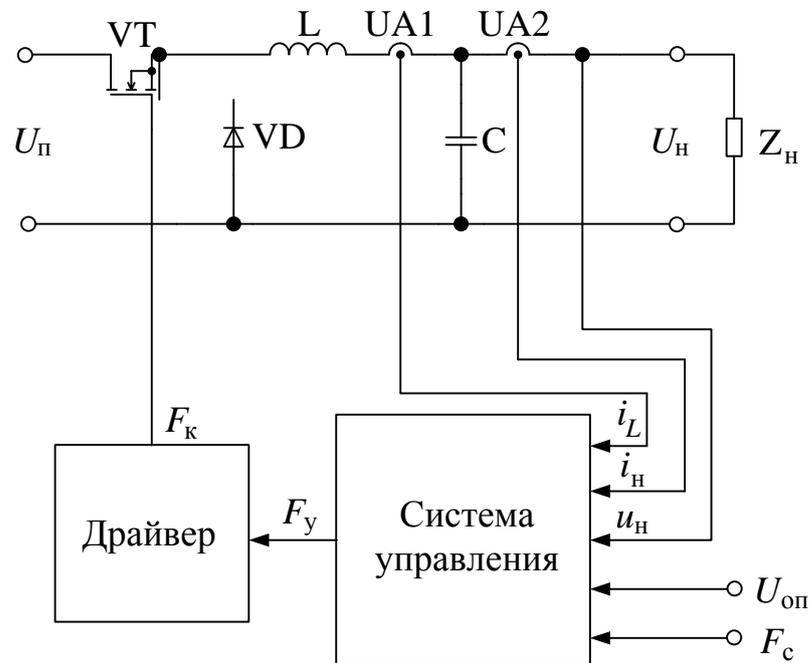


Рис. 3.4. Схема импульсного преобразователя напряжения

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

Индуктивность дросселя может быть оценена согласно выражению, когда силовой ключ замкнут:

$$L(n) = \frac{t(n) - t(n - 1)}{(I_L(n) - I_L(n - 1))} (U_{п} - U_n) ,$$

а если силовой ключ разомкнут:

$$L(n) = \frac{t(n) - t(n - 1)}{I_L(n - 1) - I_L(n)} U_H, \quad (3.4)$$

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 выражению (3.4) не требуется датчик входного напряжения, то в алгоритме управления ПН использовалось именно выражение (3.4). Чтобы уменьшить влияние погрешности измерения индуктивности на результат, окончательное значение индуктивности получим после усреднения полученных ранее данных:

$$L = a_1 L + b_1 L(n), \quad (3.5)$$

где a_1 , b_1 – коэффициенты.

Выражение (3.5), по существу, является фильтром нижних частот первого порядка с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр) [29, 41].

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

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 осуществляется синхронизирующим F_c и управляющим F_y сигналами. Управляющий сигнал F_y формируется компаратором по сигналу энергетического баланса $F_э$, который вычисляется в соответствии с уравнением (3.3).

При модуляции заднего фронта импульса в соответствии с (3.3) закон управления примет вид:

$$F_y = F_э + Y_p ;$$

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

где t_n, t_{n+1} – моменты синхронизации; t_{nk} – момент выключения VT, определяемый наименьшим положительным корнем уравнения $F_y = 0$ на n -м периоде модуляции.

Устойчивость периодических режимов в системе на частоте ШИМ обеспечивается, если крутизна пилообразного сигнала развёртки больше максимальной крутизны изменения энергетического баланса системы в установившемся периодическом режиме [99]:

$$\frac{A_p}{T} > \left. \frac{dF_э}{dt} \right|_m = \frac{2}{C} \left. \frac{dW}{dt} \right|_m = \frac{2}{C} Q_{э.м} ;$$

где $Q_{э.м}$ – максимальное значение реактивной мощности LC-фильтра.

Учитывая, что для рассматриваемой схемы

$$Q_{э.м} = \frac{U_H^2 T}{2L} ,$$

получим

$$A_p = \frac{U_H^2 T^2}{LC} .$$

Проанализируем динамические и энергетические характеристики на модели ПН с управлением по балансу необходимой и накопленной энергии.

3.3. Динамические характеристики преобразователя напряжения

Анализ влияния закона управления (3.3) на динамические процессы, протекающие в ПН проведём на модели с параметрами, представленными в табл. 3.1.

Таблица 3.1

| Наименование параметра | Значение |
|--|----------|
| Напряжение питания, $U_{п}$, В | 40 |
| Заданное выходное напряжение, $U_{оп}$, В | 28,5 |
| Индуктивность дросселя, L , мГн | 0,3 |
| Ёмкость конденсатора, C , мФ | 1,65 |
| Период опроса, мкс | 1,75 |
| Сопrotивление нагрузки, $R_{н}$, Ом | 2,85 |

Для этого рассчитаем минимально возможную длительность переходного процесса.

Так, при включении VT с нулевых начальных условий на сопротивление нагрузки $R_{н} \rightarrow \infty$ первое выключение должно происходить в момент времени $t_{к}$ при $F_{э} = 0$ и

$$U_{нк} = U_{п}(1 - \cos(\omega_0 t_{к})) ;$$

$$I_{ск} = \frac{U_{п}}{\rho} \sin(\omega_0 t_{к}) ;$$

$$t_{к} = \frac{1}{\omega_0} \arccos\left(1 - \frac{U_{нк}^2}{U_{п}^2}\right) ,$$

где $U_{нк}$, $I_{ск}$ – напряжение и ток конденсатора LC-фильтра в момент первого выключения VT; $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – собственная угловая частота LC-фильтра.

С учётом того, что на интервале разомкнутого состояния транзистора VT энергия, которая была накоплена LC-фильтром, должна обеспечить, к моменту окончания переходного процесса $t = T_{пп}$, заряд конденсатора C до заданного выходного напряжения $U_{оп}$, справедливо уравнение

$$U_{оп} \cos(\omega_0 (T_{пп} - t_{к})) = U_{нк} ,$$

откуда

$$T_{пп} = t_{к} + \frac{1}{\omega_0} \arccos\left(\frac{U_{нк}}{U_{оп}}\right) .$$

Для заданных в табл. 3.1 параметров ПН получим $t_{к} = 0,513$ мс; $U_{нк} = 10,15$ В; $I_{ск} = 62,45$ А; $T_{пп} = 1,36$ мс.

Переходный процесс имеет минимальную длительность потому, что интеграл $\int_0^{t_{к}} F_{э}(t) dt \rightarrow \min$, так как на интервале $(0; t_{к})$ используются максимальные ресурсы управления ($F_{к} = 1$) и его длительность минимальна.

Моделирование процесса включения при нулевых начальных условиях на модели ПН (рис. 3.4) с управлением по алгоритму (3.3) показали, что выходное напряжение устанавливается на уровне $U_n = 28,5 \pm 0,03$ В, а ток дросселя $i_L = 10,0 \pm 2,0$ А. Таким образом длительность переходного процесса превышает минимально возможную её величину менее чем на 4,5 % (рис. 3.5).

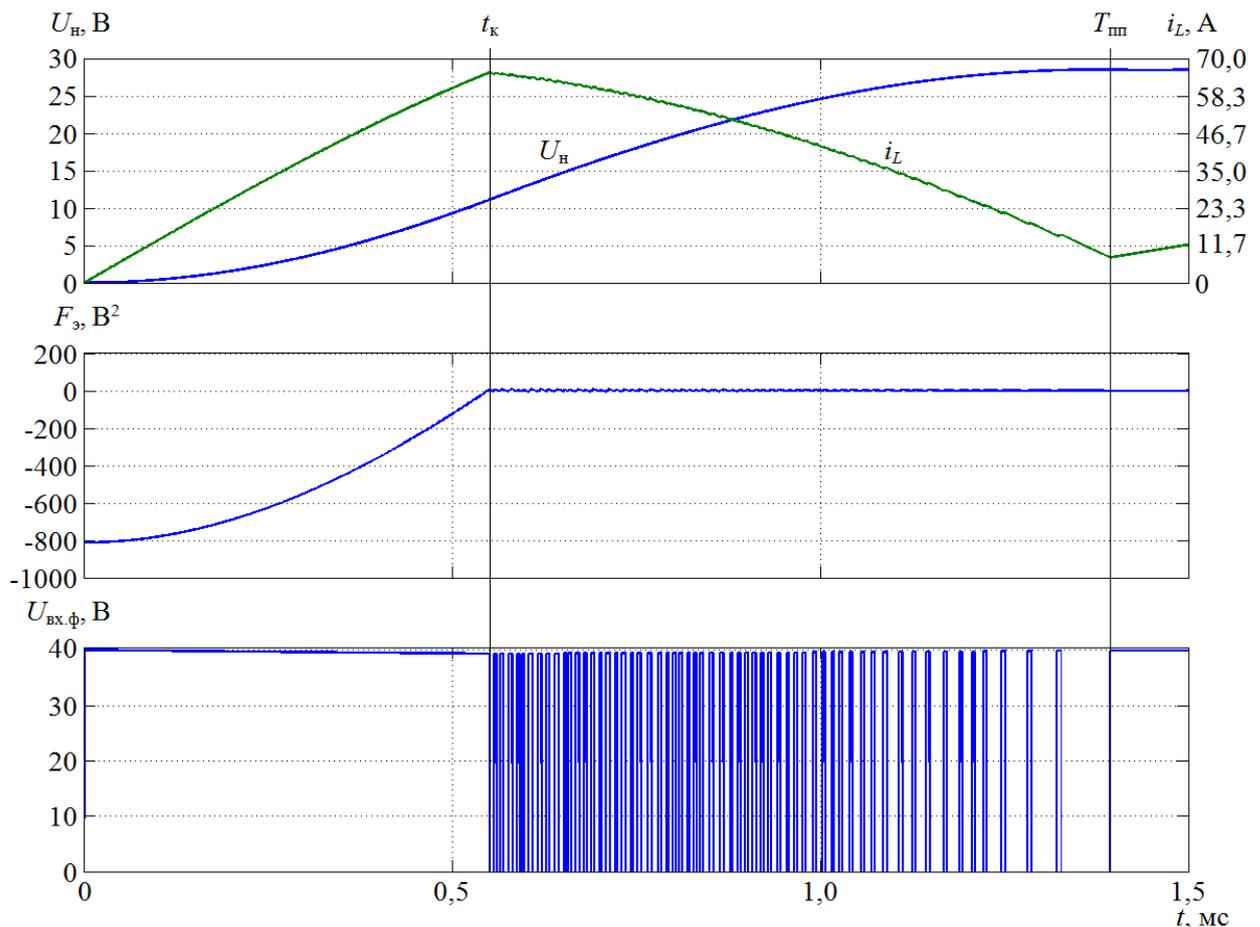


Рис. 3.5. Переходный процесс преобразователя при включении с нулевых начальных условий

Результаты исследований позволили оценить влияние нестабильности параметров LC-фильтра на статические и динамические характеристики. Установлено, что увеличение значения индуктивности дросселя или величины ёмкости конденсатора на 25 и 50 % соответственно приводят к увеличению длительности переходного процесса (рис. 3.6, б, в). Однако, при этом, уменьшается амплитуда пульсаций выходного напряжения. Соответственно уменьшение этих значений приводит к снижению

длительности переходного процесса, но увеличивая пульсации выходного напряжения (рис. 3.6, а, г). Статическая ошибка отсутствует.

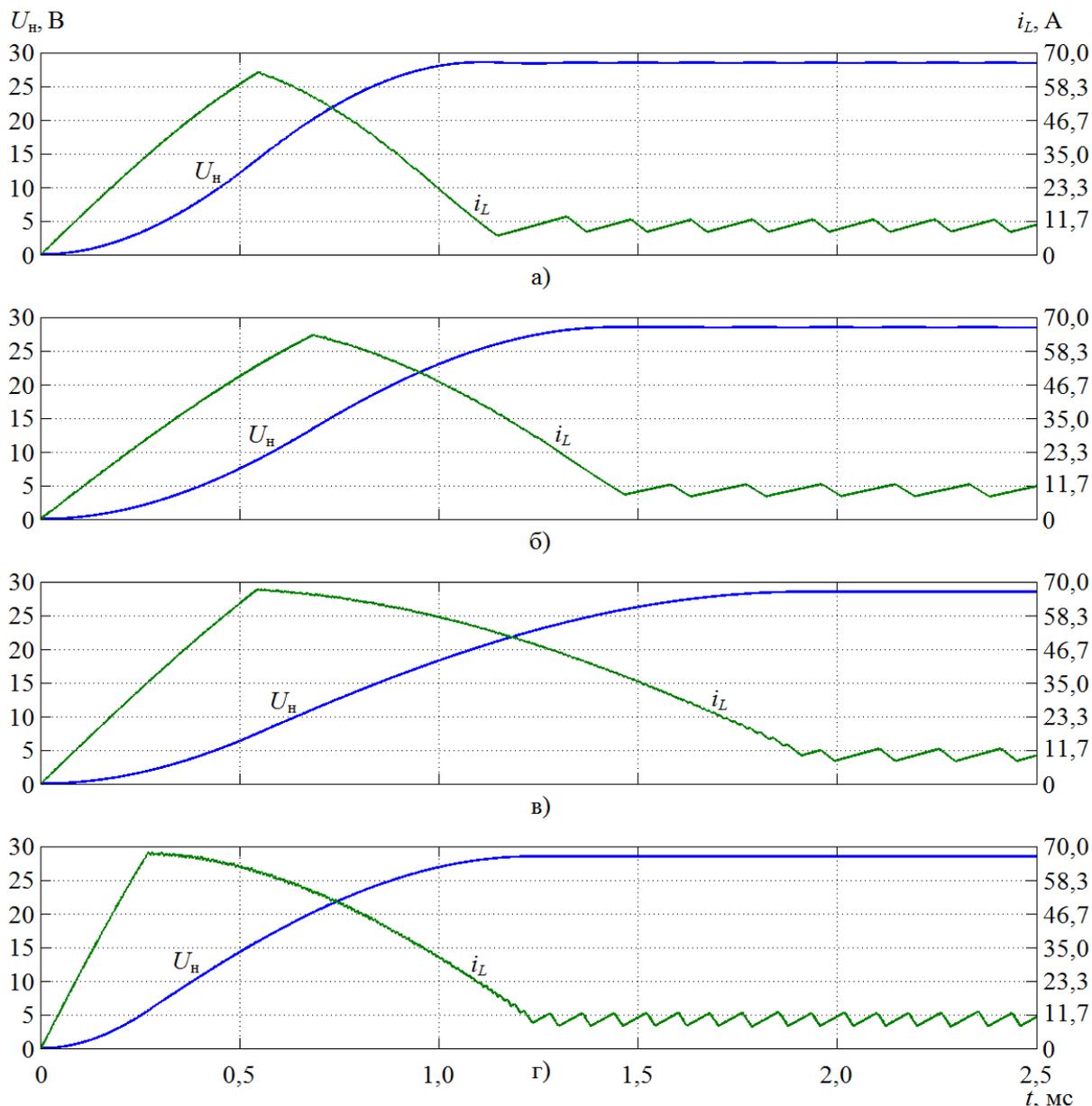


Рис. 3.6. Переходный процесс преобразователя при: а) уменьшении ёмкости конденсатора на 25 %; б) увеличении индуктивности дросселя на 25 %; в) увеличении ёмкости конденсатора на 50 %; г) уменьшении индуктивности дросселя на 50 %

С целью оценки устойчивости режимов работы системы были проведены исследования влияния помех по цепям питания и нагрузки на выходные параметры ПН с управлением по балансу.

Если представить входное напряжение с периодическим воздействием как:

$$U_{\text{ПВ}} = U_{\text{П}} + U_{\text{ВВ}} \sin(2\pi f_{\text{ВВ}} t),$$

где $U_{\text{ВВ}}$ и $f_{\text{ВВ}}$ – амплитуда и частота напряжения периодического возмущения по цепи питания.

Как показали исследования, при $U_{\text{ВВ}} \leq 0,2 U_{\text{П}}$ и $f_{\text{ВВ}} \leq 5$ кГц система остаётся в зоне регулирования, а возмущение в цепи питания отрабатывается с минимальной ошибкой, не превышающей 0,2 % (рис. 3.7).

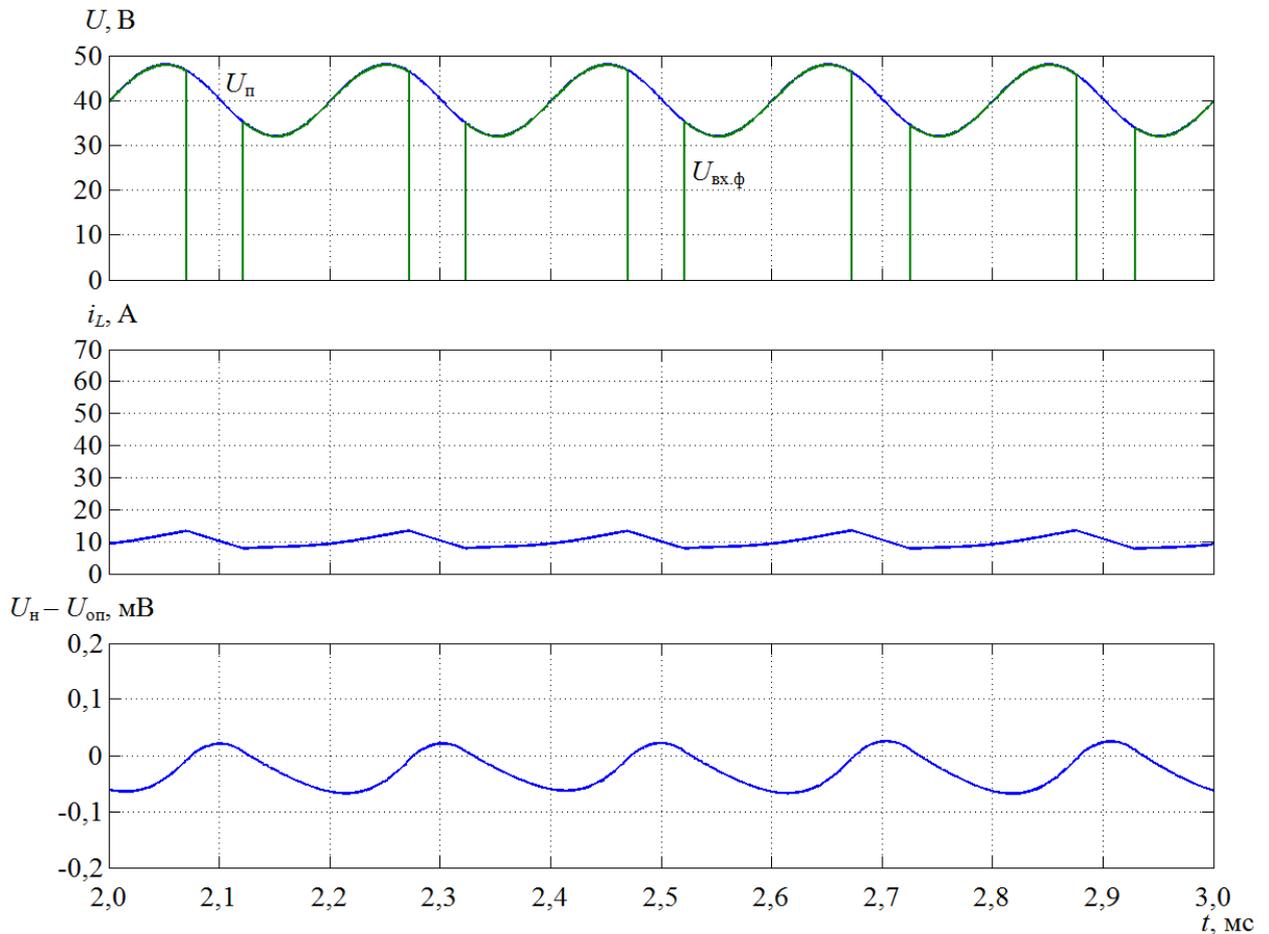


Рис. 3.7. Влияние синусоидальной помехи по цепи питания на выходное напряжение при $U_{\text{ВВ}} = 8$ В, $f_{\text{ВВ}} = 5$ кГц.

Аналогично, ток нагрузки с учётом периодического воздействия можно записать как:

$$i_{\text{H}} = I_{\text{H}} + I_{\text{ВВ}} \sin(2\pi f_{\text{ВВ}} t),$$

где $I_{\text{ВВ}}$ и $f_{\text{ВВ}}$ – амплитуда и частота тока периодического воздействия по цепи нагрузки.

Было установлено, что в диапазоне при $I_{\text{ВВ}} \leq 0,1 I_{\text{H}}$ и $f_{\text{ВВ}} \leq 5$ кГц ток дросселя i_L отслеживает изменения тока нагрузки i_{H} и система остаётся в зоне регулирования (рис. 3.8).

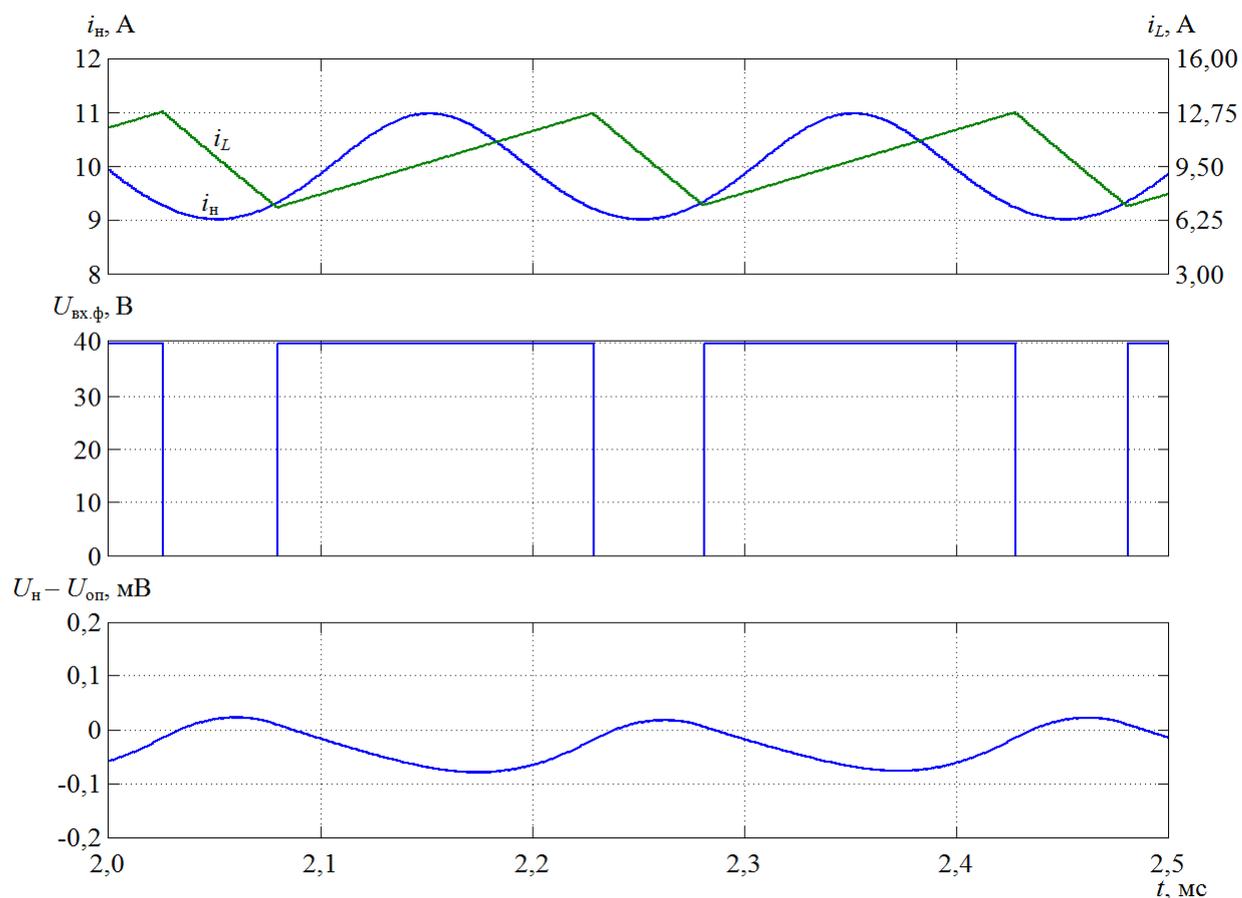


Рис. 3.8. Влияние синусоидального изменения тока нагрузки на выходное напряжение при $I_{\text{вв}} = 1 \text{ A}$, $f_{\text{вв}} = 5 \text{ кГц}$.

В случае скачкообразного изменения тока нагрузки (рис. 3.9) ток дросселя увеличивается с крутизной $(U_{\text{п}} - U_{\text{н}}) / L$, при сбросе – уменьшается с крутизной $U_{\text{н}} / L$, переходный процесс при $\Delta I_{\text{н}} = 5 \text{ A}$ завершается, примерно, за 0,3 мс установлением номинального значения выходного напряжения и пульсации тока дросселя.

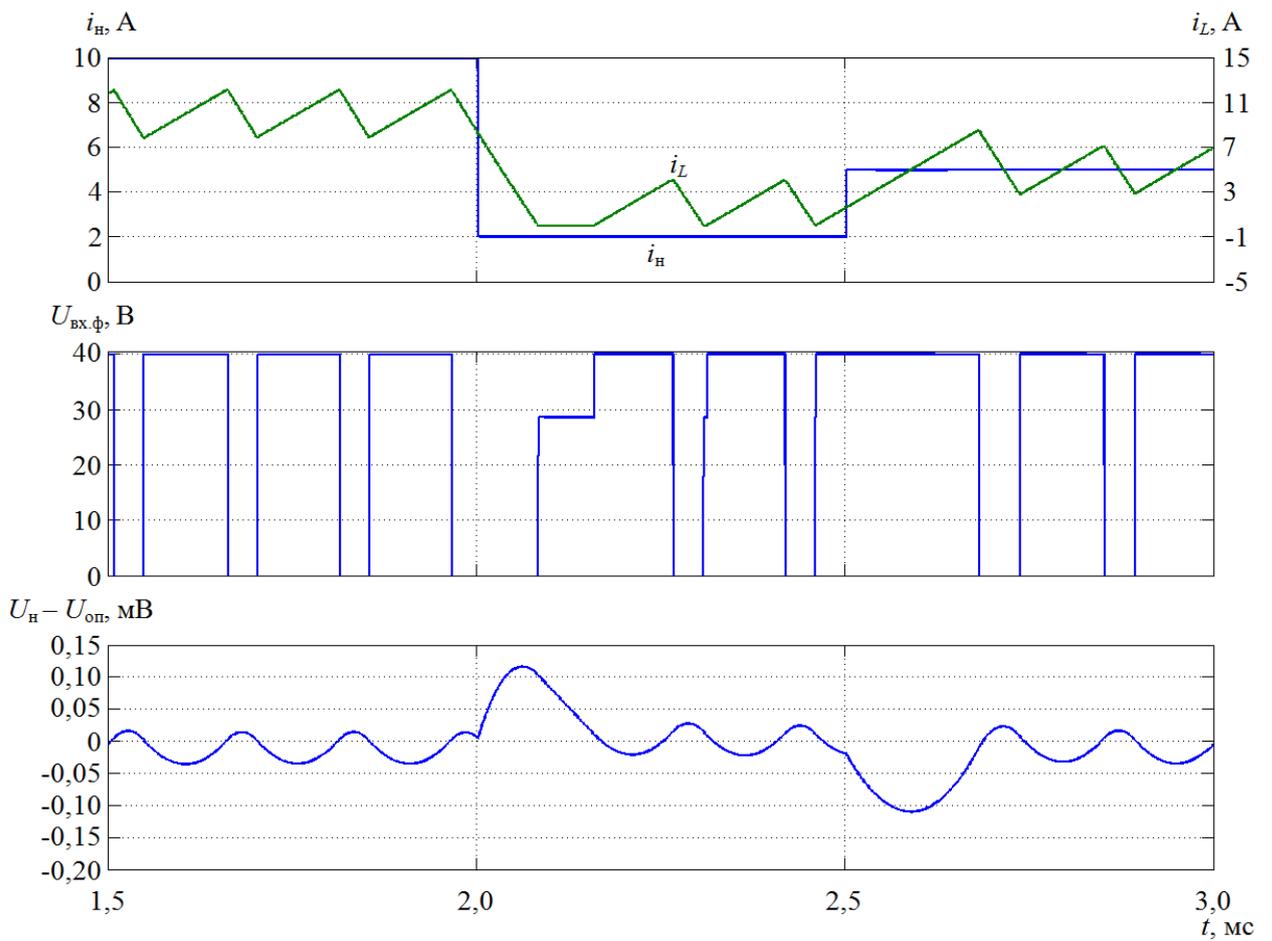


Рис. 3.9. Скачкообразное уменьшение и увеличение нагрузки преобразователя

Рассмотрим работу в следящем режиме. Гармоническое изменение опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ происходит с частотой 1 кГц и амплитудой 25 мВ и отслеживается с запаздыванием относительно U_H , не превышающим 7° (рис. 3.10).

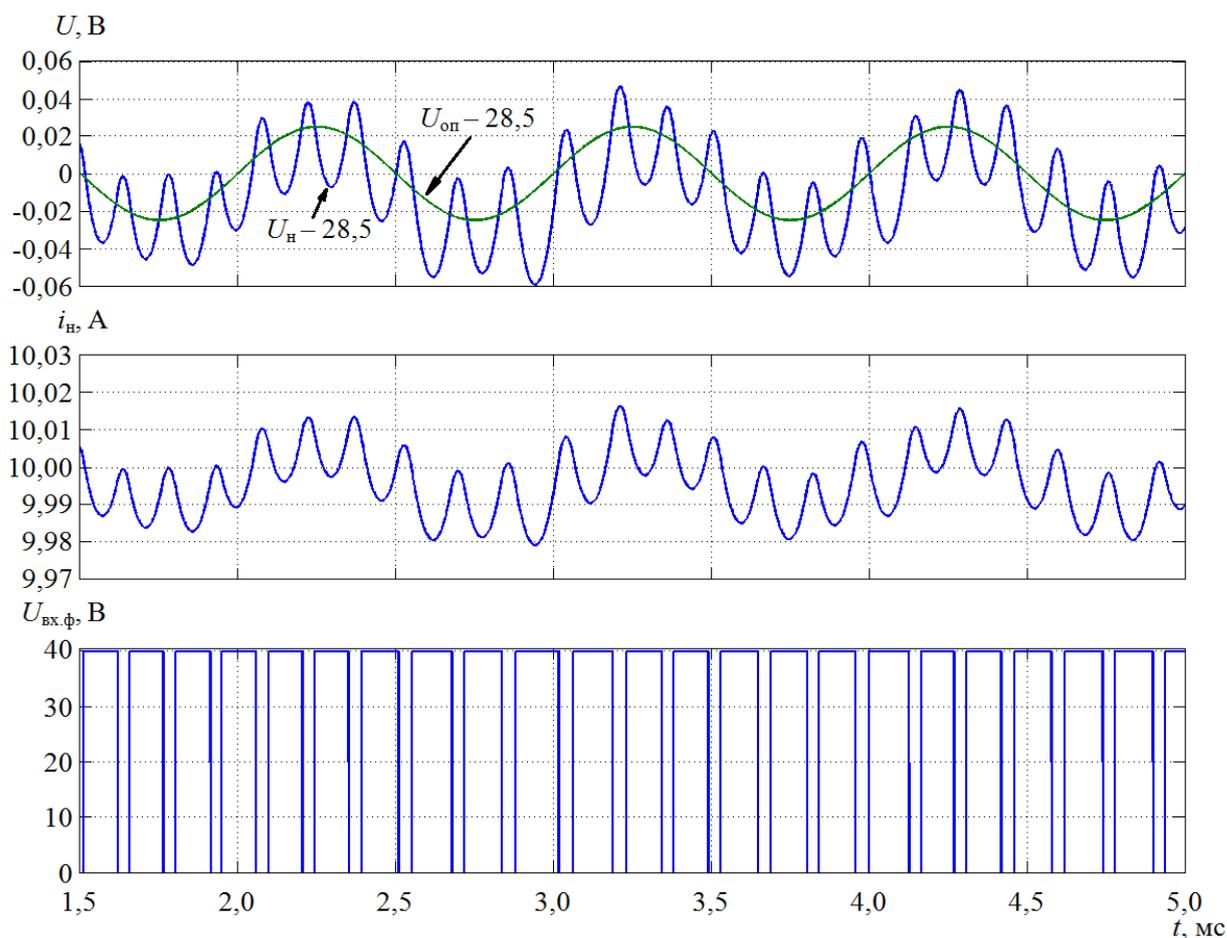


Рис. 3.10. Режим работы с циклическим изменением опорного напряжения

Применение алгоритмов управления по балансу необходимой и накопленной энергии позволяет улучшить динамические характеристики ПН, по сравнению с классическими алгоритмами управления по отклонению выходной величины. Несмотря на то, что использование управления по балансу энергий приводит к усложнению системы управления силовым преобразователем, оно может быть оправдано в системах, предъявляющих повышенные требования к длительности и качеству переходных процессов. В том числе и в составе электроприводов периодического движения.

3.4. Выводы

1. Разработан ПН с цифровой системой управления для асинхронного электропривода с пульсирующим законом движения с алгоритмами управления: ПИД – регулятор; управление в релейном режиме по балансу необходимой и накопленной энергии; управление по балансу необходимой и накопленной энергии с ШИМ.
2. Установлено, что ПН с управлением по балансу энергии превосходят преобразователи с ПИД-регуляторами с точки зрения динамических характеристик (меньшая длительность переходных процессов при включении и сборе / набросе нагрузки).
3. Алгоритм управления по балансу энергии с ШИМ уступает по динамическим характеристикам алгоритму управления по балансу энергии, но превосходит его с точки зрения электромагнитной совместимости.
4. Доказано, что увеличение значения индуктивности дросселя или уменьшение величины ёмкости конденсатора приводит к увеличению длительности переходного процесса, а уменьшение индуктивности дросселя или увеличение ёмкости конденсатора приводит к возникновению перерегулирования и, как следствие, к увеличению длительности переходного процесса.
5. Индуктивность дросселя фильтра может быть вычислена динамически во время работы ПН, при этом алгоритм вычисления индуктивности дросселя может быть использован для «плавного запуска» ПН.

IV. Математическое моделирование электропривода периодического движения

Раздел посвящён математическому моделированию асинхронного электропривода с пульсирующим законом движения при потенциальных видах модуляции и при питании от импульсного преобразователя постоянного напряжения.

Современные требования, предъявляемые к приводам антенн радиолокационных станций [95] или оптико-механических устройств со сканированием [34], обуславливают углубленное изучение динамических процессов, протекающих в электроприводах периодического движения. Поскольку натурные экспериментальные исследования увеличивают финансовые затраты и сроки разработки, наиболее целесообразным представляется использование при комплексных исследованиях математического моделирования [91].

В качестве системы моделирования электропривода периодического движения была выбрана среда MATLAB Simulink [19, 22, 67].

Рассматриваемая модель электропривода пульсирующего движения построена на базе двухфазного асинхронного электродвигателя (АД), работающего непосредственно в режиме периодического движения за счёт линейной фазовой или балансной амплитудной модуляции питающих напряжений с прерыванием одного из них в моменты времени, когда электромагнитный момент АД переходит через ноль [33, 35, 36]. Полная модель электропривода состоит из моделей импульсного преобразователя напряжения (ПН) и двухфазного асинхронного двигателя с обобщённой нагрузкой на валу.

Модель электропривода пульсирующего движения в математической среде Simulink представлена на рис. 4.1.

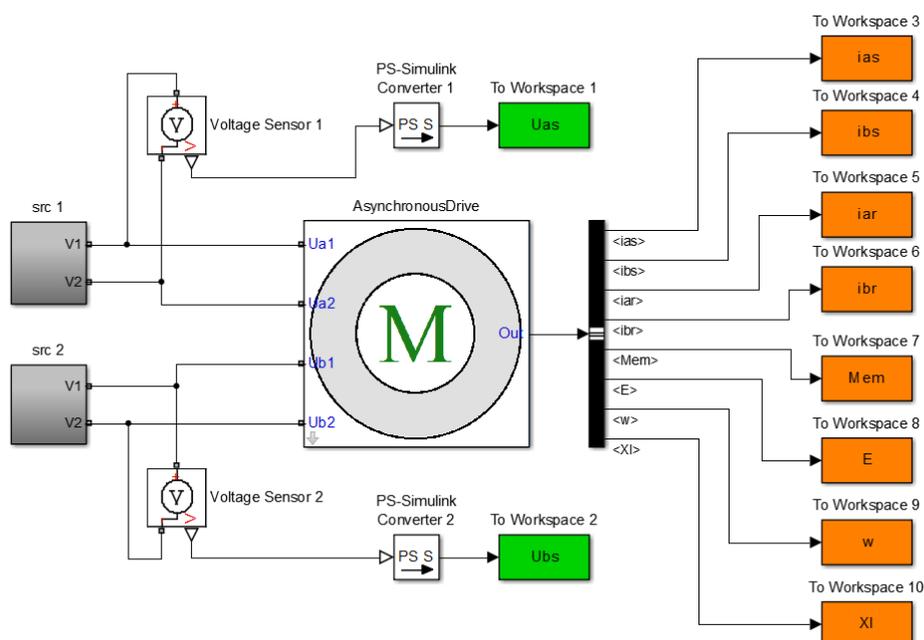


Рис. 4.1. Имитационная модель электропривода пульсирующего движения в математической среде Simulink

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).

Согласно внутреннему строению подсистемы src1 (рис. 4.2) Sine Wave задаёт частоту пульсаций, а блоки Saturation и Sign формируют единичную прямоугольную функцию. Амплитуда пульсаций задаётся блоком Constant.

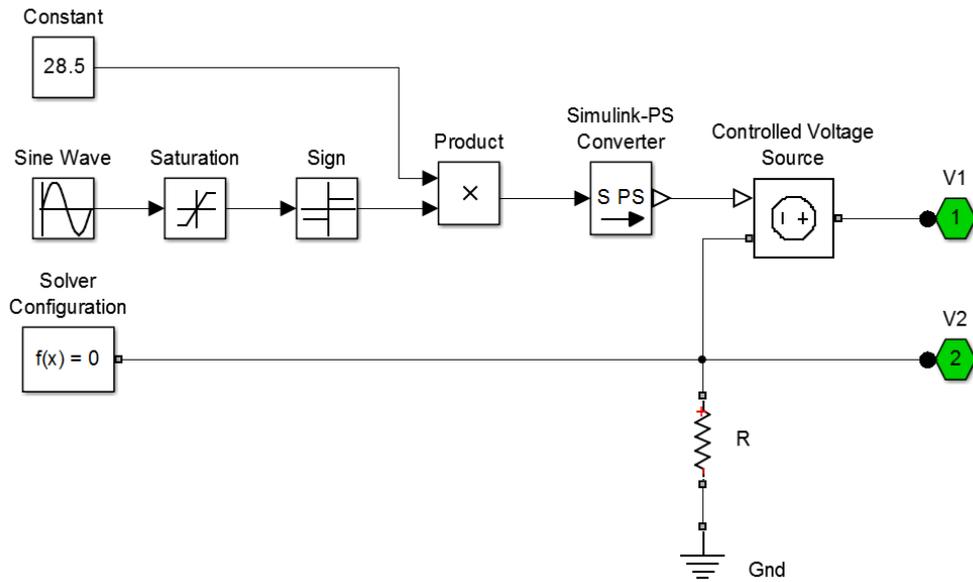


Рис. 4.2. Внутренне строение подсистемы src1

Общий вид формируемого напряжения подсистемой src1 представлен на рис. 4.3.

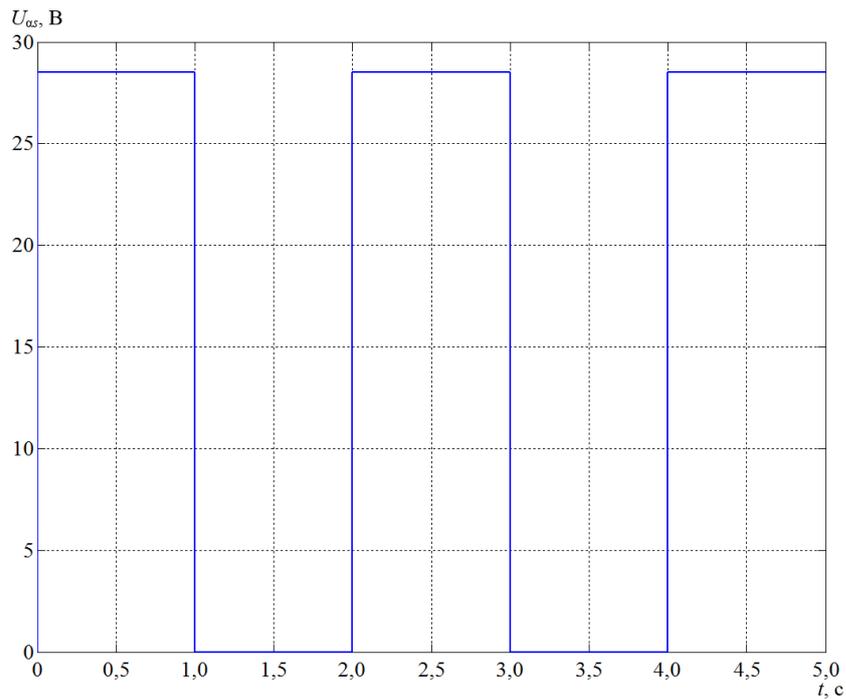


Рис. 4.3. Напряжение питания обмотки статора

Вторая обмотка статора АД питается от источника постоянного напряжения, создаваемого подсистемой src2 (рис. 4.4).

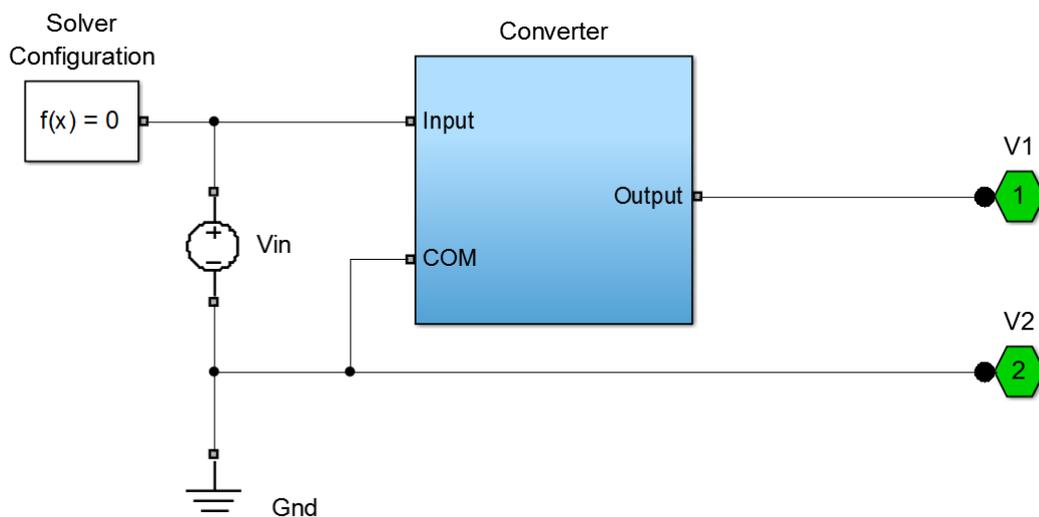


Рис. 4.4. Внутренне строение подсистемы src2

На рис. 4.4 V_{in} – источник входного напряжения, Converter – ПН, модель которого реализована согласно рис. 4.5.

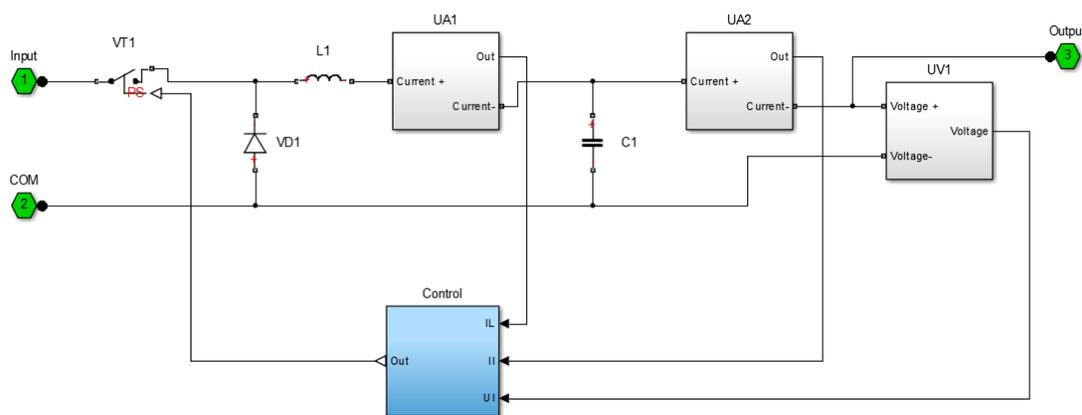


Рис. 4.5. Модель импульсного преобразователя напряжения

4.1. Моделирование импульсного преобразователя напряжения

Модель импульсного преобразователя напряжения (рис. 4.5) содержит силовой транзистор $VT1$, диод $VD1$, дроссель фильтра $L1$, конденсатор фильтра $C1$, датчики тока $UA1$, $UA2$, датчик напряжения $UV1$, систему управления ПН Control.

Во время работы ПН значения тока дросселя, тока нагрузки и напряжения нагрузки поступают в систему управления Control (рис. 4.6), которая управляет силовым транзистором $VT1$.

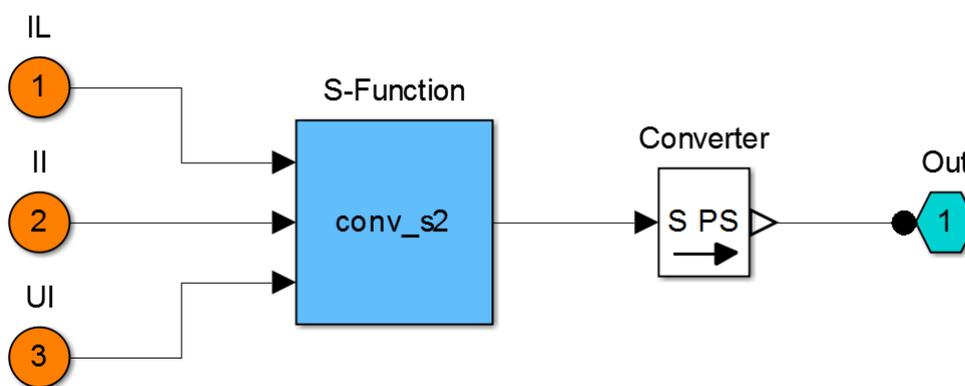


Рис. 4.6. Система управления импульсным преобразователем напряжения

Для интеграции системы управления ПН с математической моделью Simulink был выбран подход, при котором код системы управления выполняется на персональном компьютере [94]. Система управления ПН выполнена в виде Level-2 MATLAB S-функции [27]. При создании системы управления моделью использовался язык С [17, 74]. Согласно блок-схеме алгоритма работы модели (рис. 4.7) S-функция представляет собой динамически компоную библиотеку (dll) [27], экспортирующую функцию mexFunction [21]. Функция mexFunction вызывается каждый раз, когда необходимо взаимодействие вычислителя Simulink с S-функцией. При запуске математической модели S-функция (при помощи функции CreateThread [25]) запускает поток [26], 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.

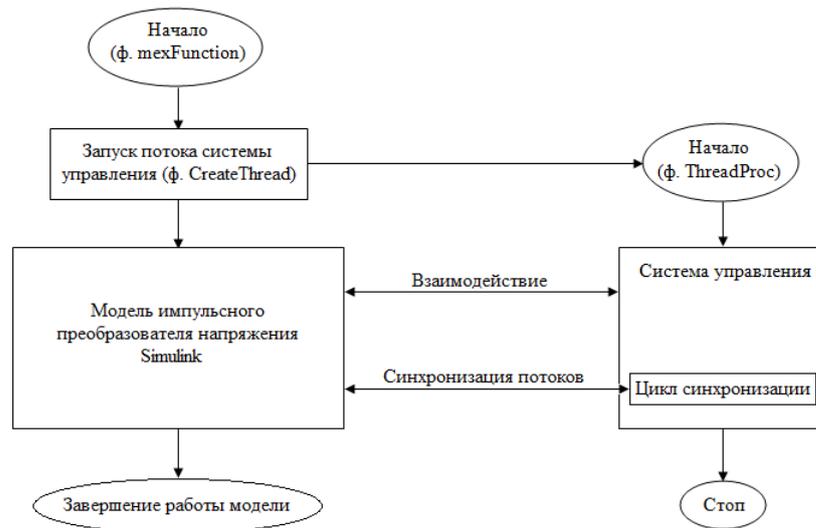


Рис. 4.7. Блок схема алгоритма работы математической модели ПН

4.2. Моделирование электромеханической части привода

Рассмотрим подробнее внутреннее строение маски [20] AsynchronousDrive (рис. 4.8).

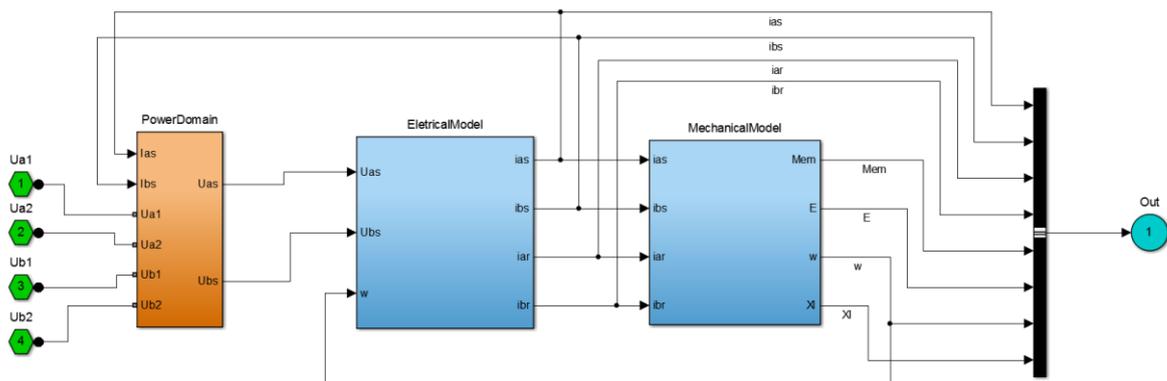


Рис. 4.8. Внутреннее строение маски AsynchronousDrive

Подсистема PowerDomain (рис. 4.9) преобразует входные электрические величины в безразмерные величины системы MATLAB/Simulink.

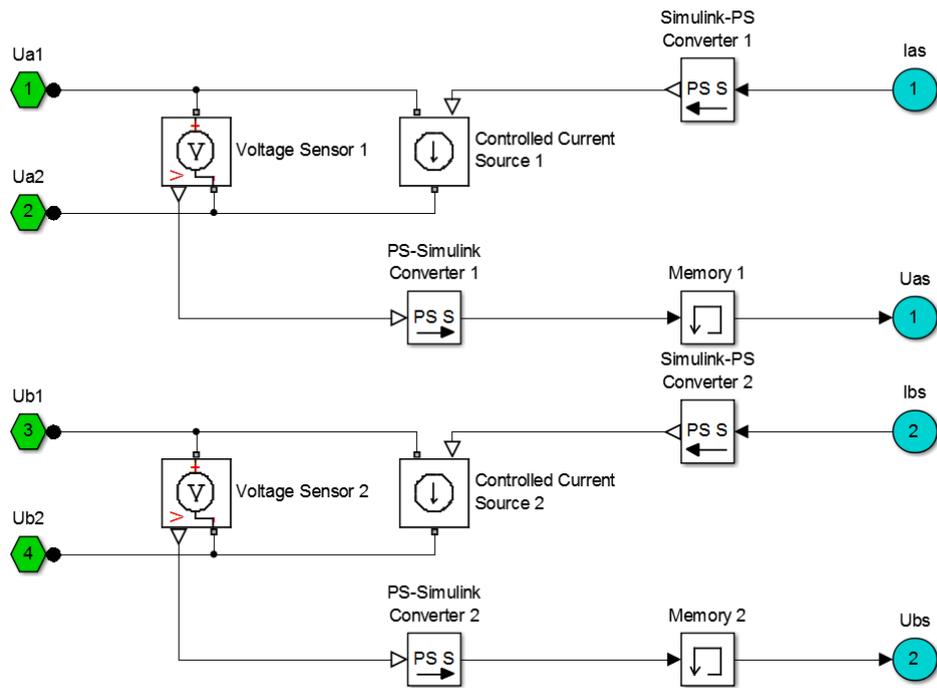


Рис. 4.9. Внутреннее строение подсистемы PowerDomain

Подсистема ElectricalModel – модель электрической части системы, разрешающая первые четыре уравнения системы относительно токов фаз (рис. 4.10).

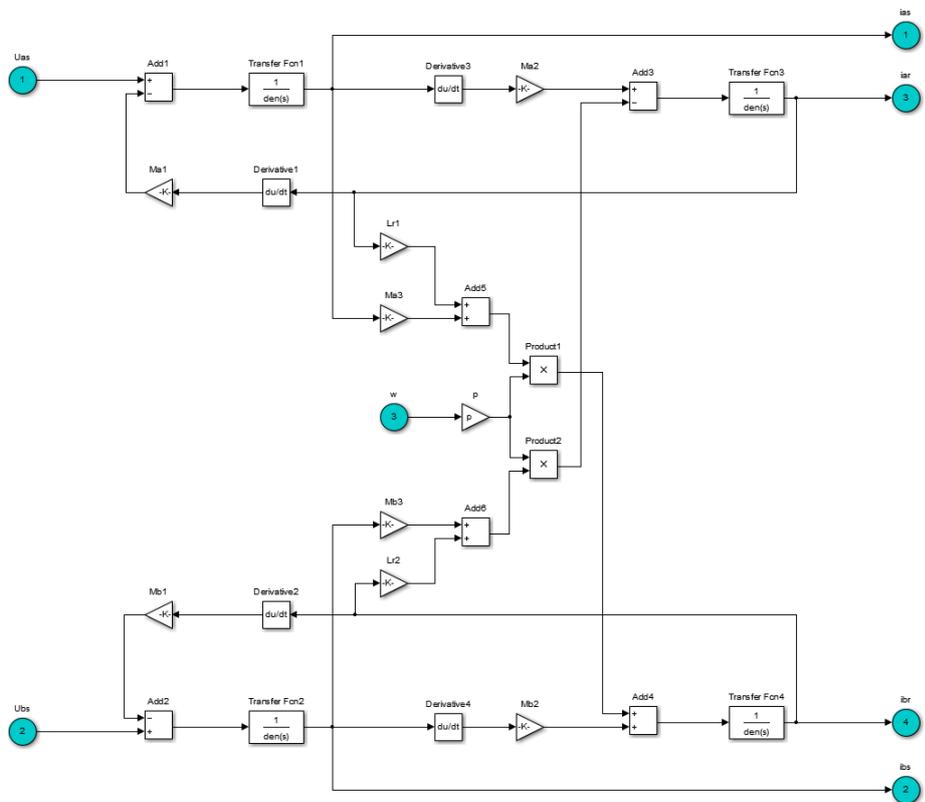


Рис. 4.10. Внутреннее строение подсистемы ElectricalModel

Подсистема MechanicalModel – модель механической части системы (рис. 4.11).

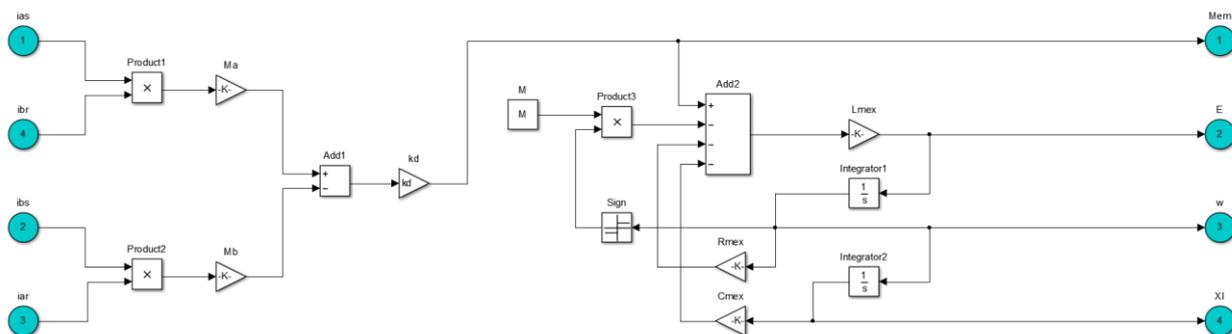


Рис. 4.11. Внутреннее строение подсистемы MechanicalModel

Альтернативой использованию графического представления системы уравнений в Simulink, является использование S-функций [24]. В частности S-функций MATLAB. Достоинством использования S-функций является более наглядная форма записи уравнений, а недостатком высокие накладные издержки при обращении к S-функции, замедляющие скорость расчёта на несколько порядков. Эту проблему можно решить, используя S-функции написанные на C [74], но это решение, также, имеет свои недостатки.

Подобное построение математической модели позволяет использовать разные вычислители для одного и того же математического описания модели и менять их при необходимости. В дальнейшем для математического моделирования использовался вычислитель ode45 (Dormand – Prince) [3, 23].

4.3. Результаты математического моделирования

При помощи математической модели получены зависимости электромагнитного момента и закона движения выходного элемента привода от времени для двигателя АИР71А2, включенного по двухфазной схеме. Также были получены спектрограммы закона движения в режиме пульсирующего движения при питании одной из обмоток постоянным током (рис. 4.12), при фазовой модуляции питающих напряжений (рис. 4.13) и амплитудной модуляции питающих напряжений (рис. 4.14).

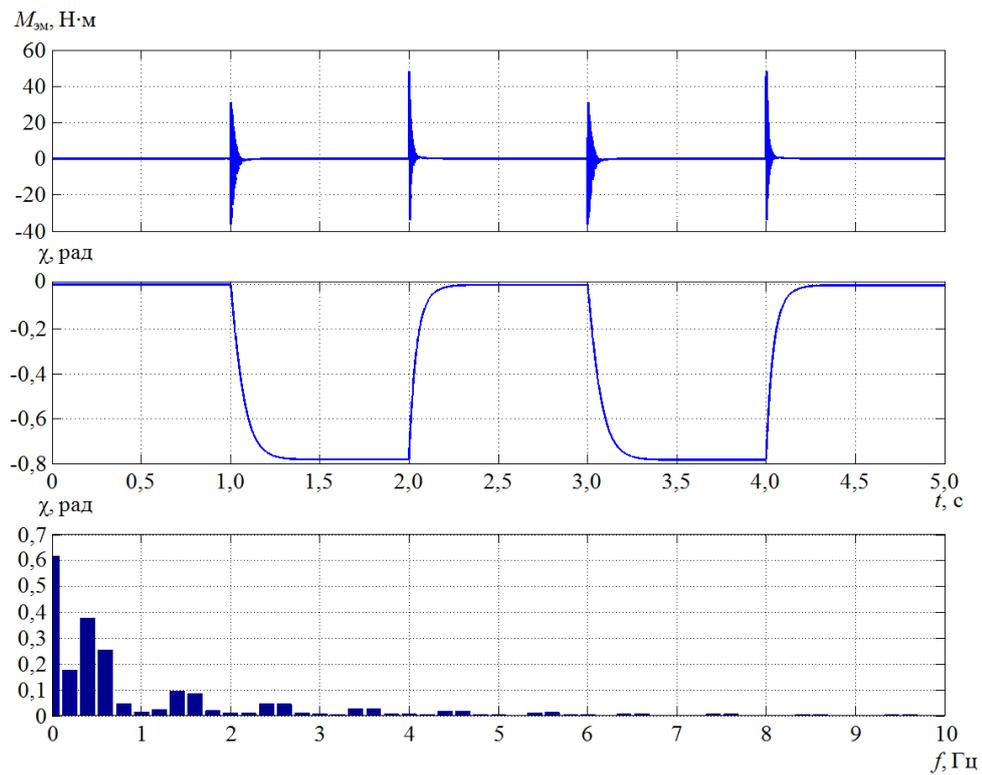


Рис. 4.12. Электромагнитный момент $M_{эм}(t)$ и закон движения выходного элемента привода $\chi(t)$ в режиме пульсирующего движения при питании одной из обмоток АД постоянным током при запуске на частоту $\Omega = \pi$ рад / с

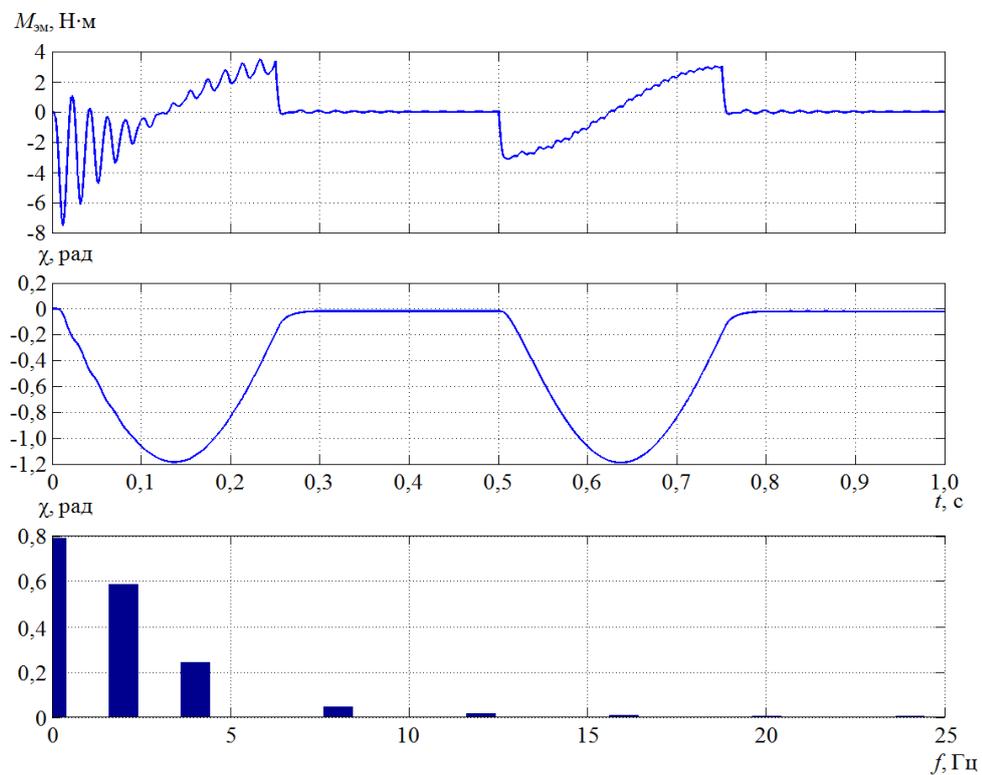


Рис. 4.13. Электромагнитный момент $M_{эм}(t)$ и перемещение выходного элемента привода $\chi(t)$ в режиме пульсирующего движения при фазовой модуляции питающих напряжений при запуске на частоту $\Omega = 4\pi$ рад / с

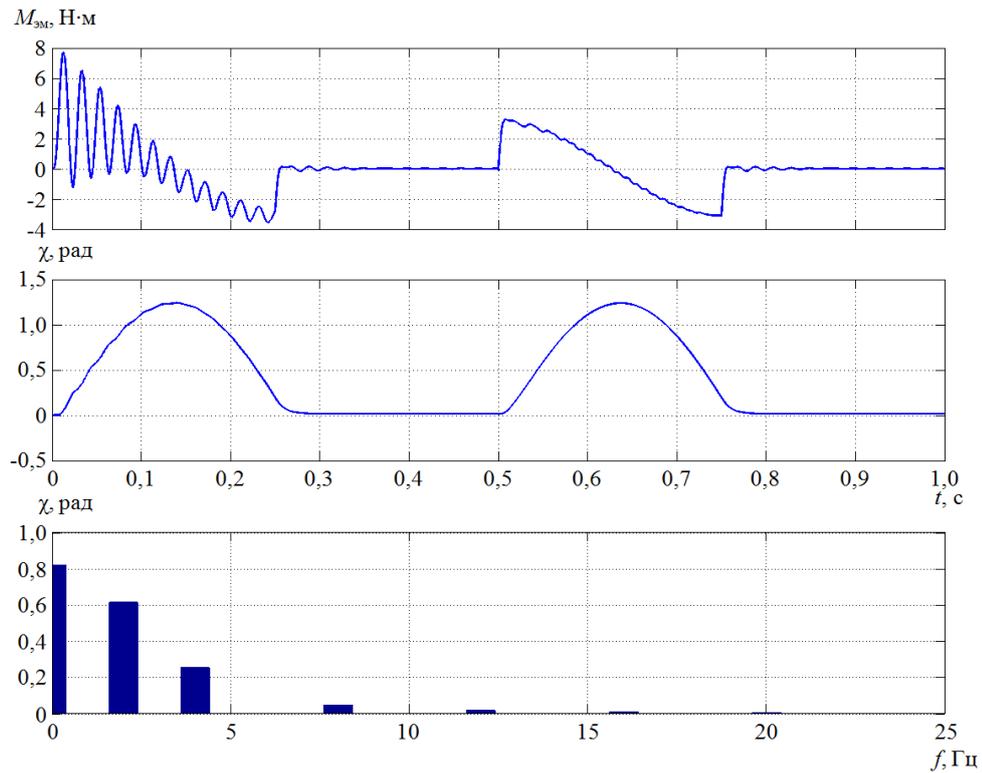


Рис. 4.14. Электромагнитный момент $M_{эм}(t)$ и перемещение выходного элемента привода $\chi(t)$ в режиме пульсирующего движения при амплитудной модуляции питающих напряжений при запуске на частоту $\Omega = 4\pi$ рад / с

Как видно из рис. 4.13 и 4.14, в электромагнитном моменте АД присутствуют высокочастотные составляющие двойной частоты питающей сети, отсутствующие при питании одной из обмоток электрической машины постоянным напряжением (рис. 4.12). Кроме того, при питании электромеханического преобразователя энергии от источника постоянного тока закон движения приближается к прямоугольной форме, что и сказывается на его спектральном составе.

4.4. Анализ энергетических характеристик при потенциальных видах модуляции

В качестве основного критерия для анализа энергетических характеристик будем использовать КПД, который определяется как:

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

где P_1 – потребляемая (электрическая) мощность привода за период пульсации, S_2 – полезная (механическая) мощность привода за период пульсации.

Выразим КПД, через токи и напряжения фаз привода, а так же параметры движения обобщенной нагрузки.

$$\eta = \frac{\int_0^T |M_{эм}(t)\omega(t)|dt}{\int_0^T U_{\alpha s}(t)i_{\alpha s}(t)dt + \int_0^T U_{\beta s}(t)i_{\beta s}(t)dt},$$

где T – период частоты пульсаций подвижного элемента привода ($T = 2\pi / \Omega$).

Проанализируем влияние параметров АД на КПД привода. Для этого воспользуемся сценариями MATLAB, которые, анализируя данные, полученные при работе математической модели, рассчитают КПД привода на периоде пульсаций.

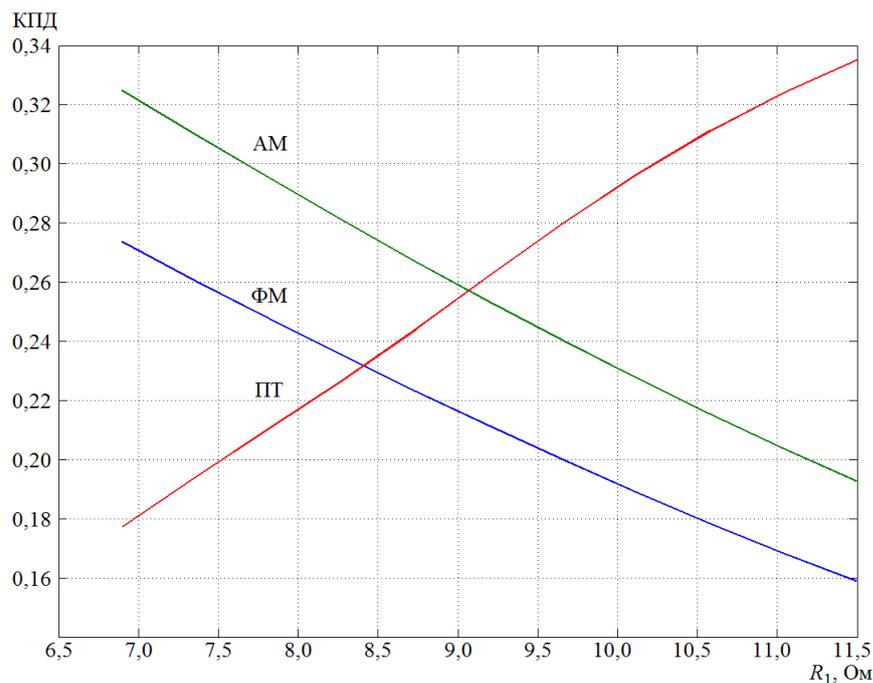


Рис. 4.15. Зависимости КПД привода от активного сопротивления обмоток статора машины

Из рис. 4.15, 4.17 и 4.18 видно, что при увеличении активных и реактивных составляющих сопротивления обмоток вверх от их номинальных значений происходит снижение КПД привода в режимах ФМ, АМ и рост КПД в режиме ПТ в указанном частотном диапазоне. В тоже время, увеличение активного сопротивления обмотки ротора приводит к

увеличению КПД в режимах ФМ и АМ и снижению его в режиме ПТ (рис. 4.16).

Снижение КПД в режимах АМ и ФМ связано с тем, что потребление энергии электрической машиной уменьшается гораздо медленнее (рис. 4.17 и 4.18), чем электромагнитный момент.

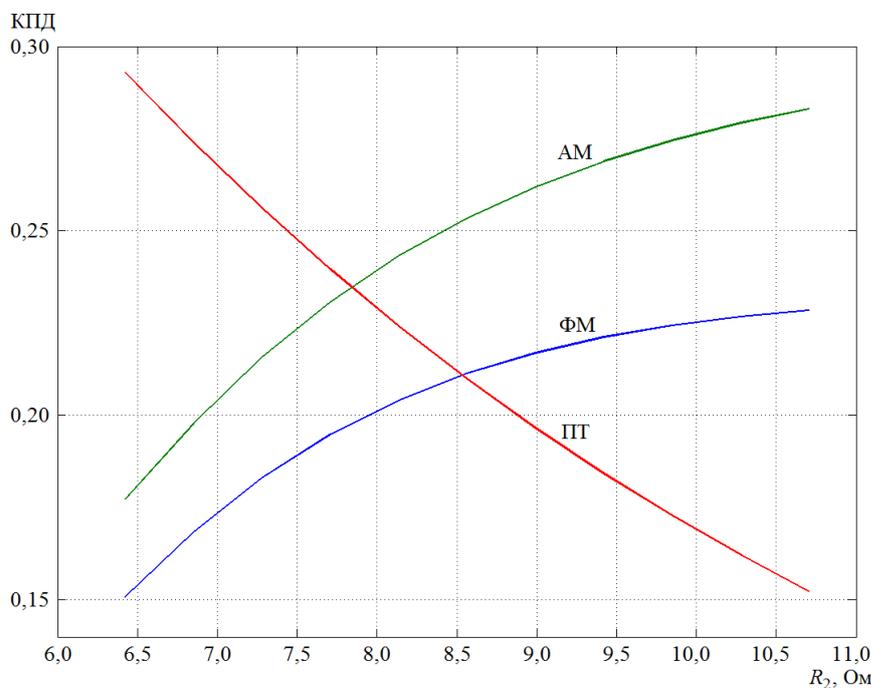


Рис. 4.16. Зависимости КПД привода от активного сопротивления обмоток ротора машины

В свою очередь, увеличение активного сопротивления обмотки ротора приводит к росту КПД в режимах ФМ, АМ и уменьшению в режиме ПТ (рис. 4.16).

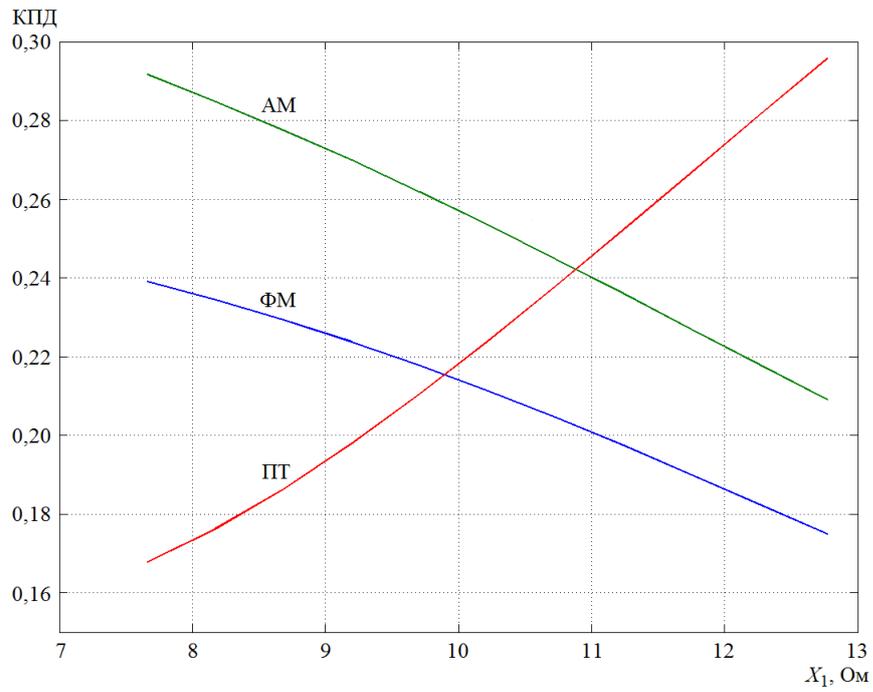


Рис. 4.17. Зависимости КПД привода от реактивного сопротивления обмоток статора машины

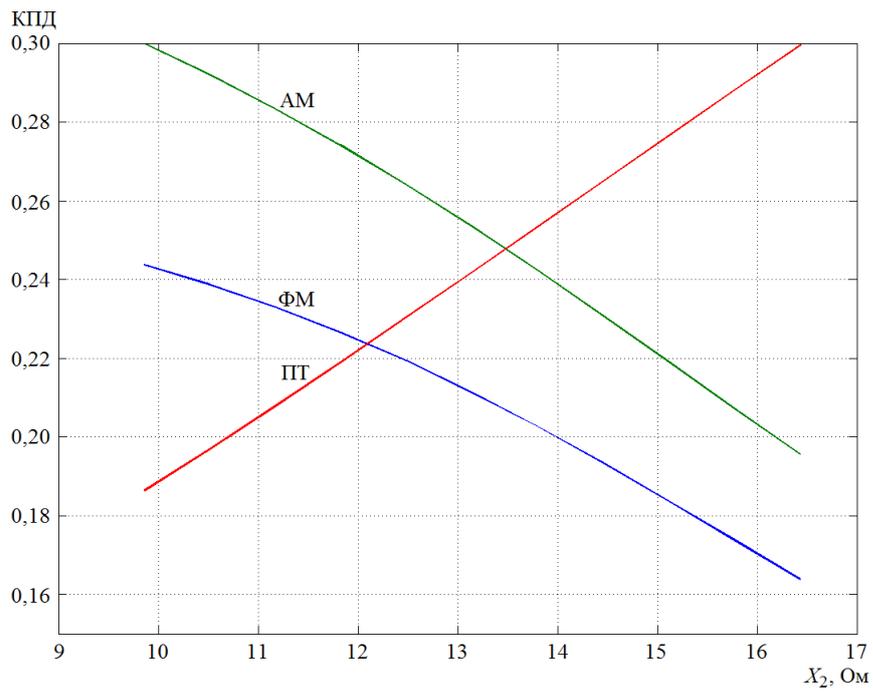


Рис. 4.18. Зависимости КПД привода от реактивного сопротивления обмоток ротора машины

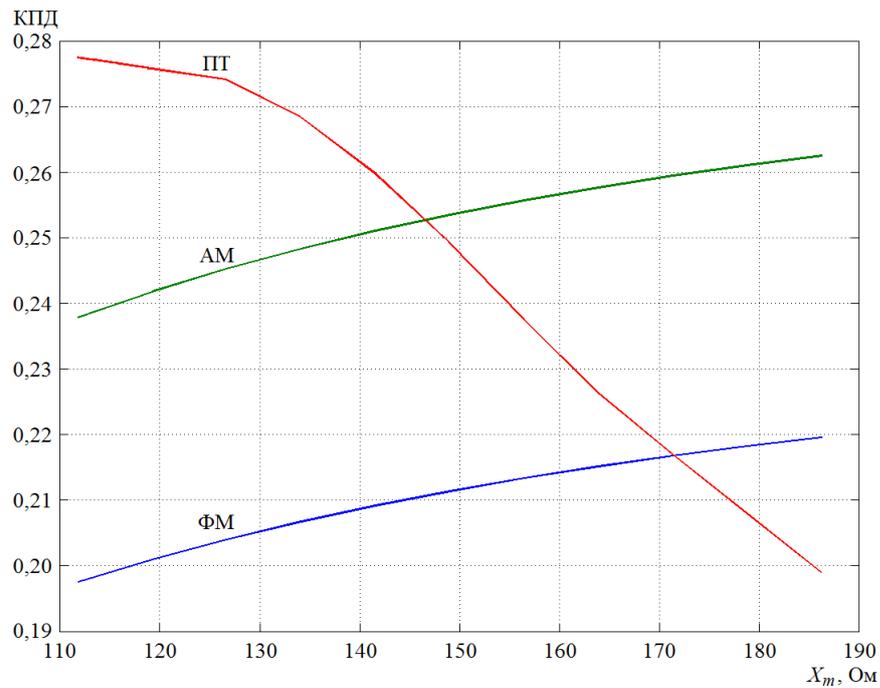


Рис. 4.19. Зависимости КПД привода от сопротивления взаимоиндукции машины

При увеличении сопротивления взаимоиндукции машины в режимах ФМ и АМ КПД растёт, а в режиме ПТ снижается, на протяжении практически всего рассматриваемого диапазона (рис. 4.19).

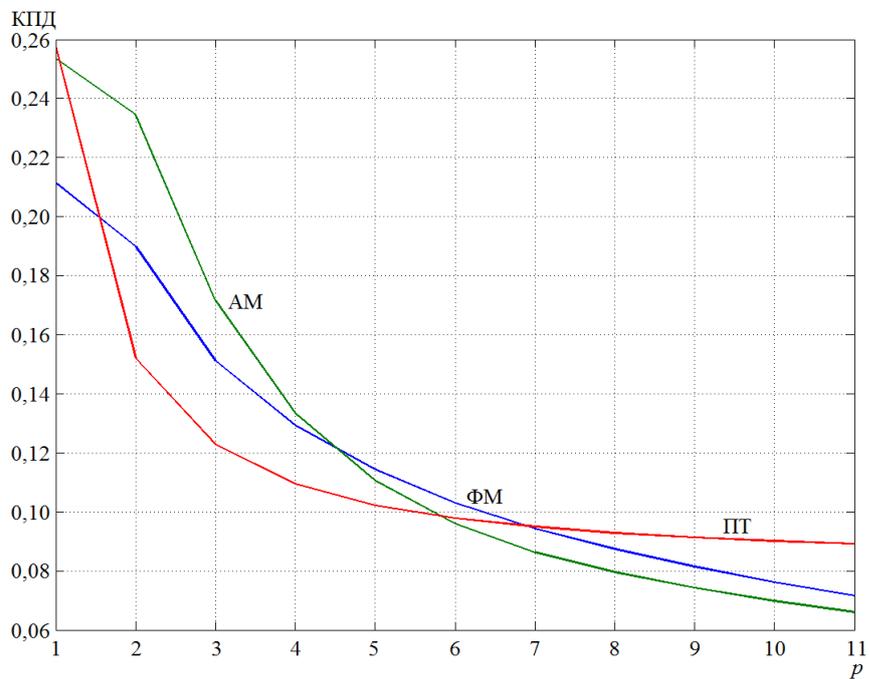


Рис. 4.20. Зависимости КПД привода от числа пар полюсов машины

Увеличение числа пар полюсов электрической машины приводит к снижению КПД привода во всех режимах (рис. 4.20).

Оценим влияние параметров нагрузки на КПД привода в режимах ФМ, АМ и ПТ.

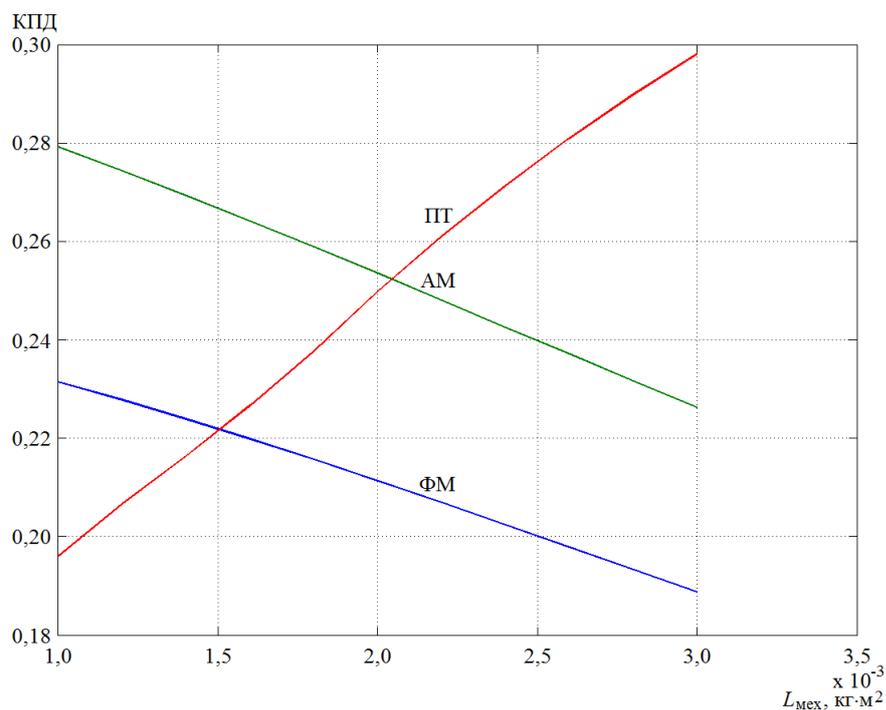


Рис. 4.21. Зависимости КПД привода от инерционной составляющей момента нагрузки

При увеличении момента инерции нагрузки в режимах ФМ и АМ КПД привода падает, а в режиме ПТ растёт (рис. 4.21). Связано это с тем, что большая инерционность нагрузки вызывает рост потребления энергии. В режиме ПТ большой момент инерции практически не влияет на потребление, но, при этом, увеличивает электромагнитный момент.

При увеличении демпфирующей составляющей момента нагрузки КПД привода снижается во всех режимах работы (рис. 4.22),

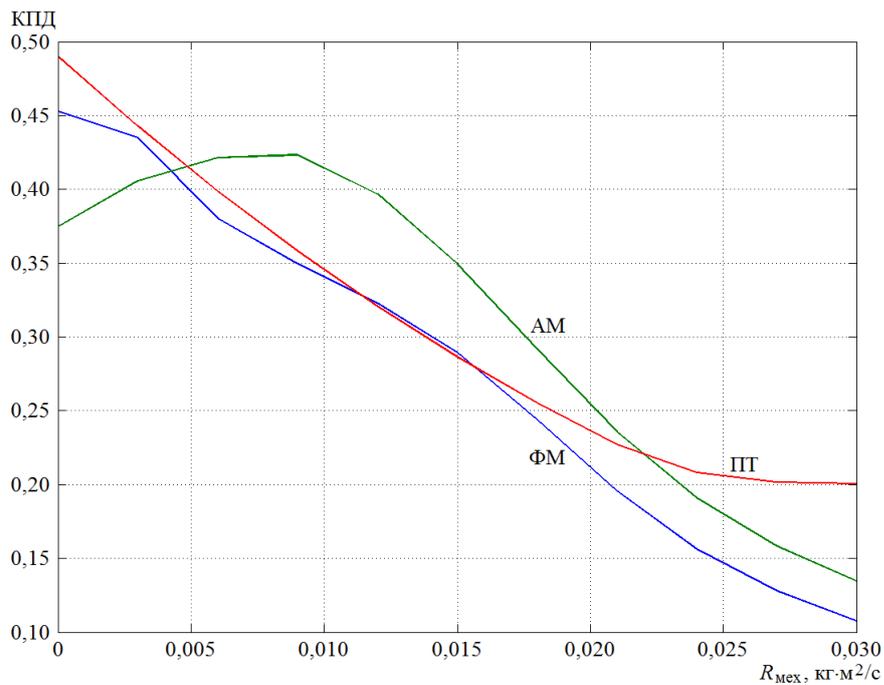


Рис. 4.22. Зависимости КПД привода от демпфирующей составляющей момента нагрузки
а при увеличении момента трения (рис. 4.23) КПД в режимах ФМ и АМ падает, а в режиме ПТ имеет точку максимума при $M_{\text{тр}}=0,6$ Н·м.

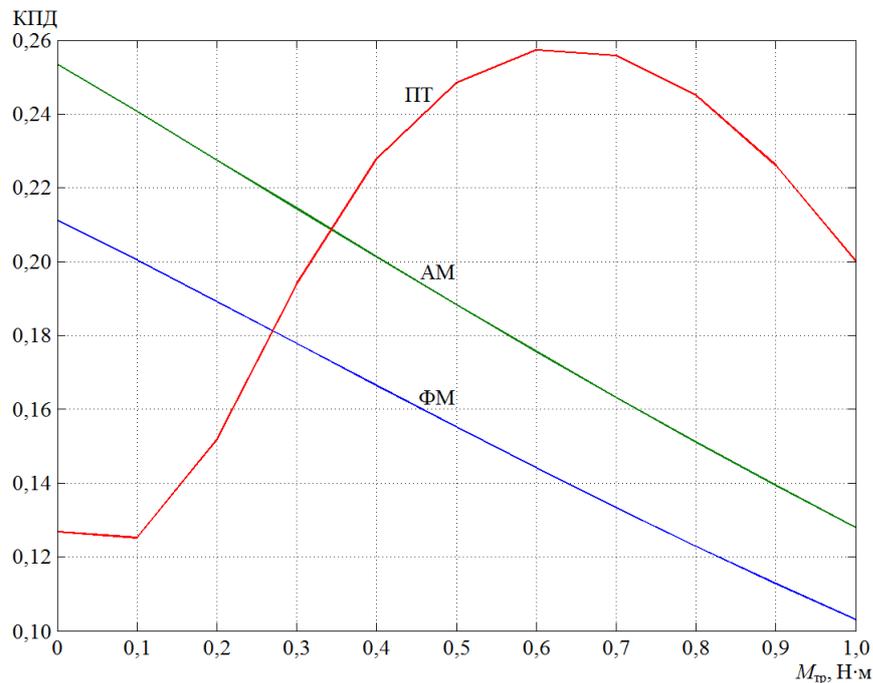


Рис. 4.23. Зависимости КПД привода от момента трения

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. 4.24).

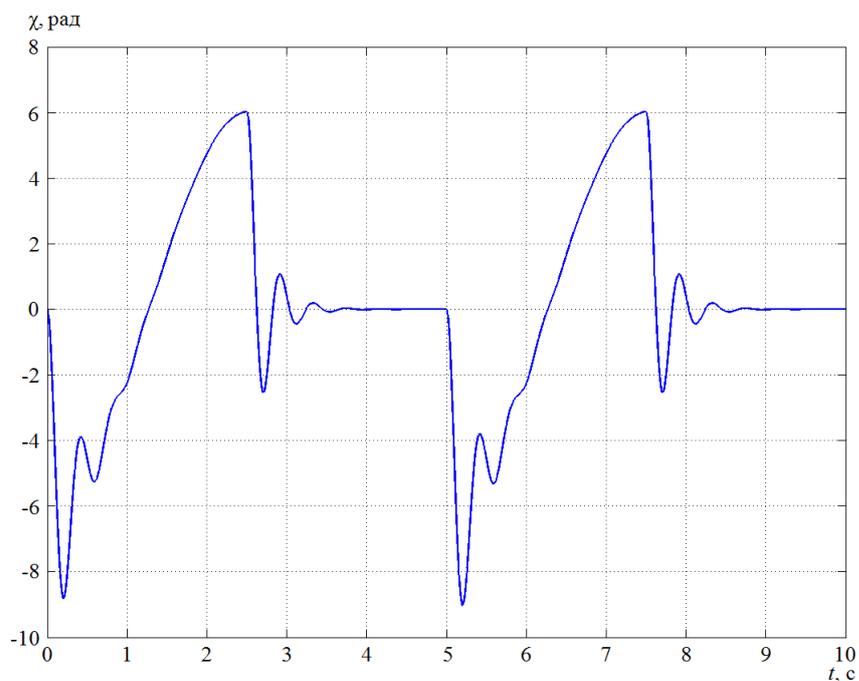


Рис. 4.24. Закон движения подвижного элемента привода при ненулевом позиционном коэффициенте нагрузки: $R_{\text{мех}} = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 / \text{с}$, $C_{\text{мех}} = 0,5 \text{ Н}\cdot\text{м} / \text{рад}$ и $\Omega = 0,4\cdot\pi \text{ рад} / \text{с}$

При увеличении действующего значения напряжения питания КПД привода в режиме ФМ и АМ увеличивается, а в режиме ПТ падает, так как в этом режиме потребление привода сильно зависит от величины напряжения питания (рис. 4.25).

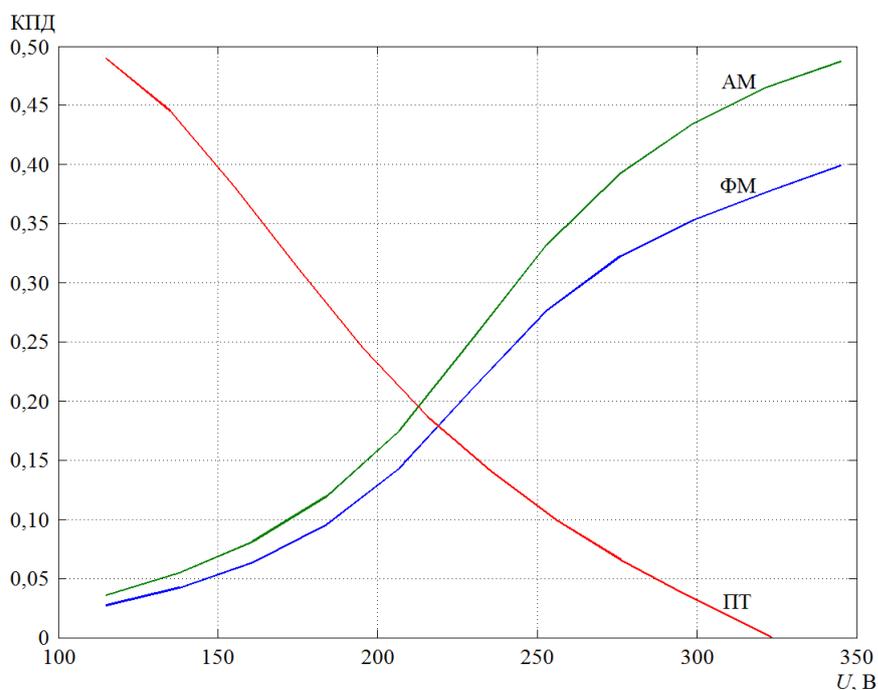


Рис. 4.25. Зависимости КПД привода от действующего значения напряжения питания машины

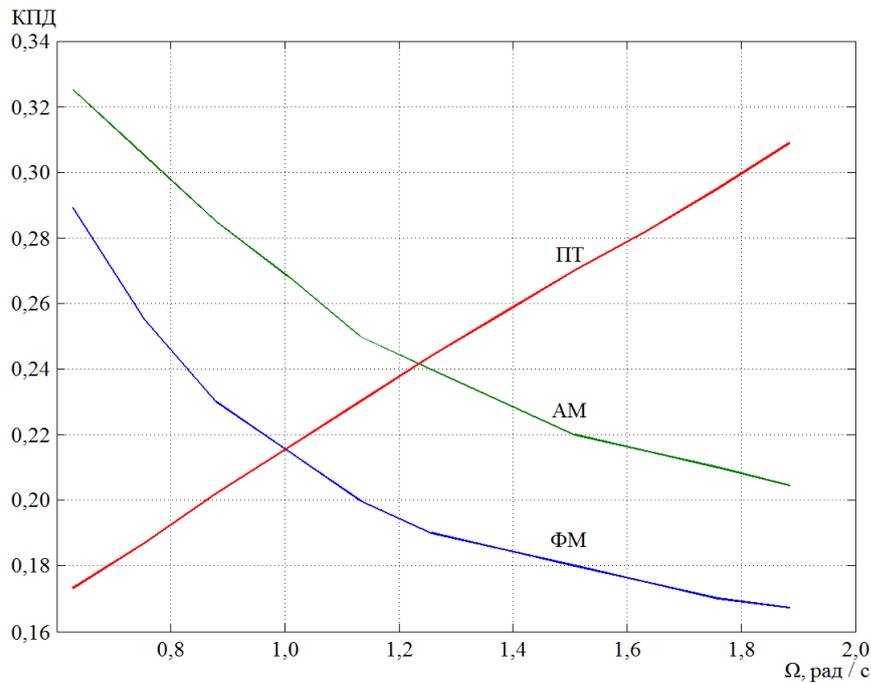


Рис. 4.26. Зависимости КПД привода от частоты пульсаций

С увеличением частоты пульсаций КПД также падает в режимах ФМ и АМ, а в режиме ПТ растёт (рис. 4.26). Снижение КПД связано с увеличением продолжительности режима мягкого реверса в режимах ФМ и АМ. В режиме ПТ чем выше частота пульсаций Ω , тем выше КПД, так как при этом снижается время простоя привода.

Изменение начальной фазы напряжения одной из фаз приводит к возникновению смещения нейтрали пульсирующего режима. При этом наблюдается увеличение КПД и когда начальная фаза напряжения $\gamma = 90^\circ$ (1,57 рад) – режим работы становится шаговым. Последний характеризуется максимальным КПД (рис. 4.27).

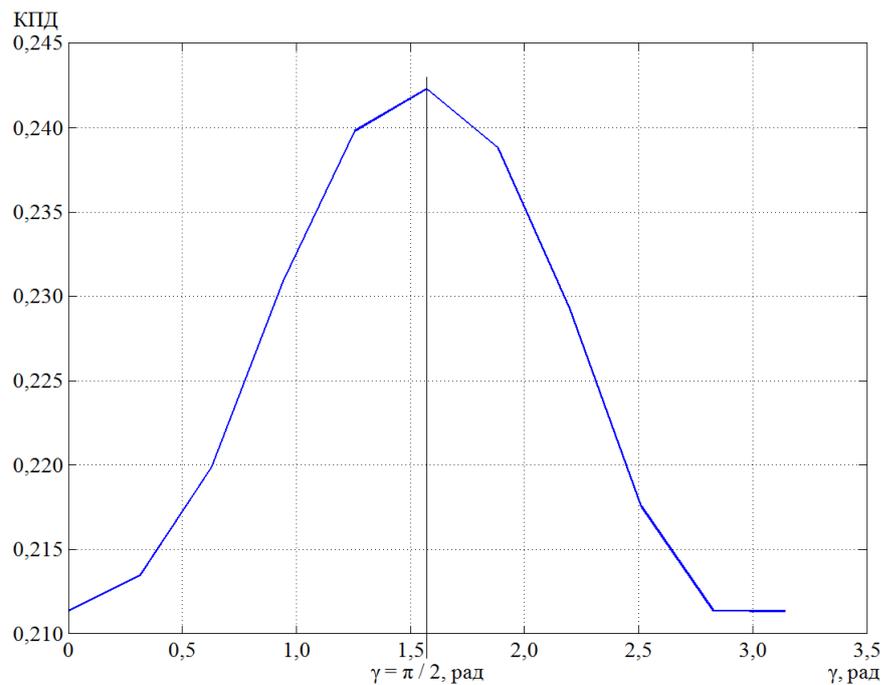


Рис. 4.27. Зависимость КПД привода от начальной фазы напряжения питания одной из обмоток машины в режиме ФМ

Так как фактически электромагнитный момент возникает, когда появляется фронт питающего напряжения на одной из обмоток исполнительного двигателя, сократить потребление энергии, увеличив при этом КПД, можно путём отключения питания обеих обмоток на время простоя привода. При этом, в моменты времени, когда необходимо перемещение выходного элемента привода достаточно воспроизводить только фронты питающего напряжения: сначала передний (рис. 4.30), а потом задний (рис. 4.31) или наоборот.

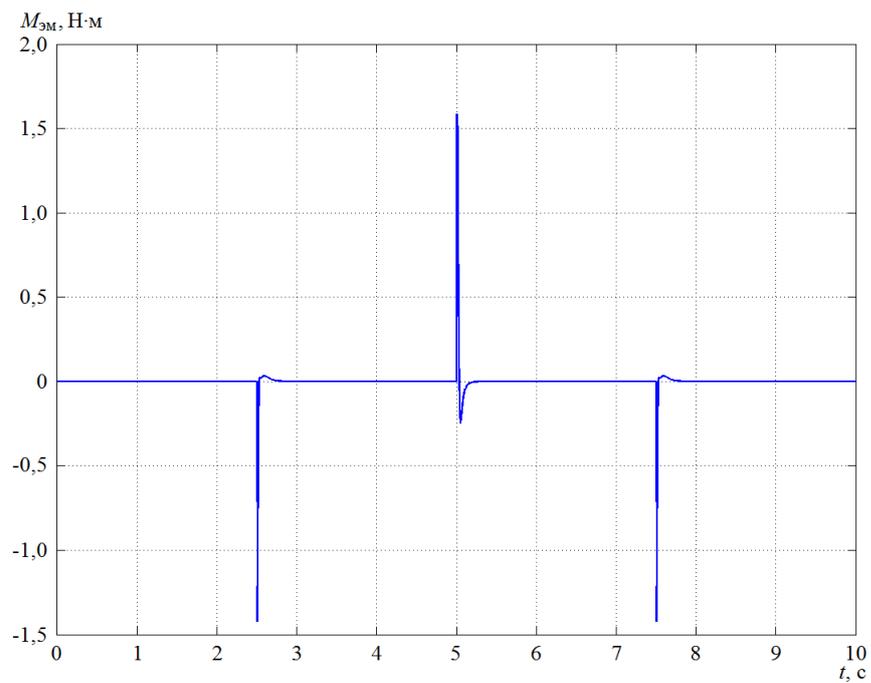


Рис. 4.28. Зависимость электромагнитного момента машины от времени при питании одной из обмоток постоянным током

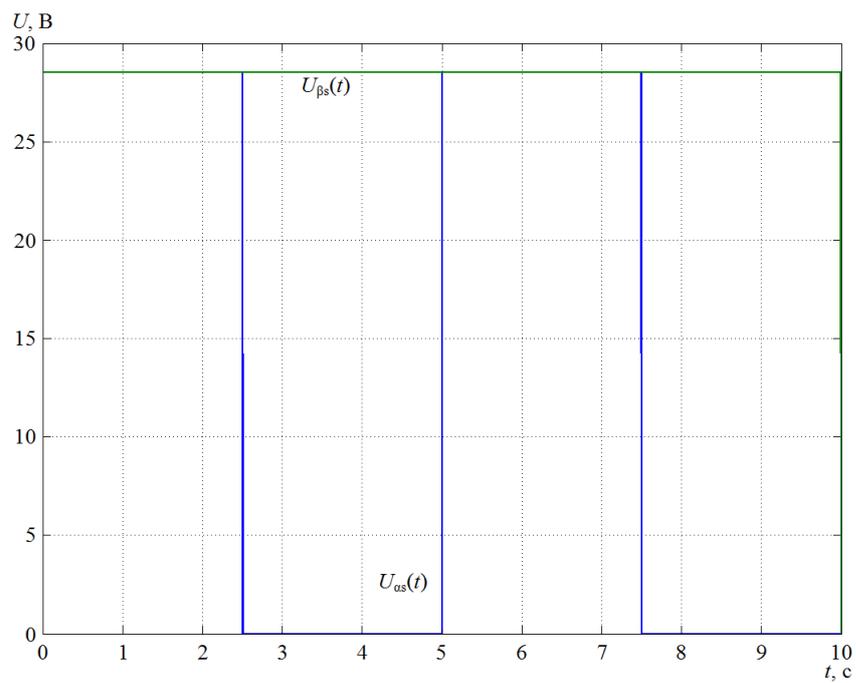


Рис. 4.29. Зависимости напряжений питания обмоток машины от времени при питании одной из обмоток постоянным током

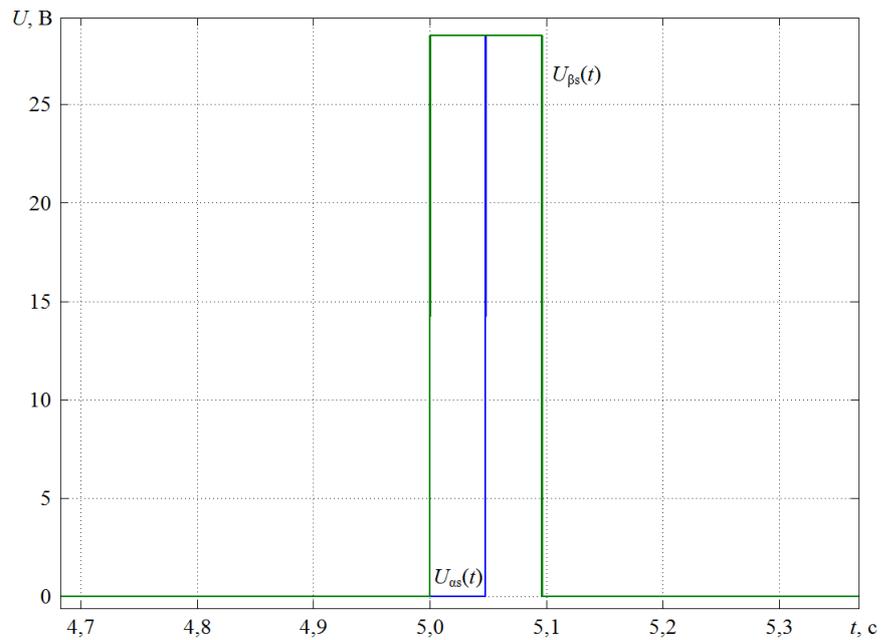


Рис. 4.30. Зависимости напряжений питания обмоток машины от времени при питании одной из обмоток постоянным током. Передний фронт

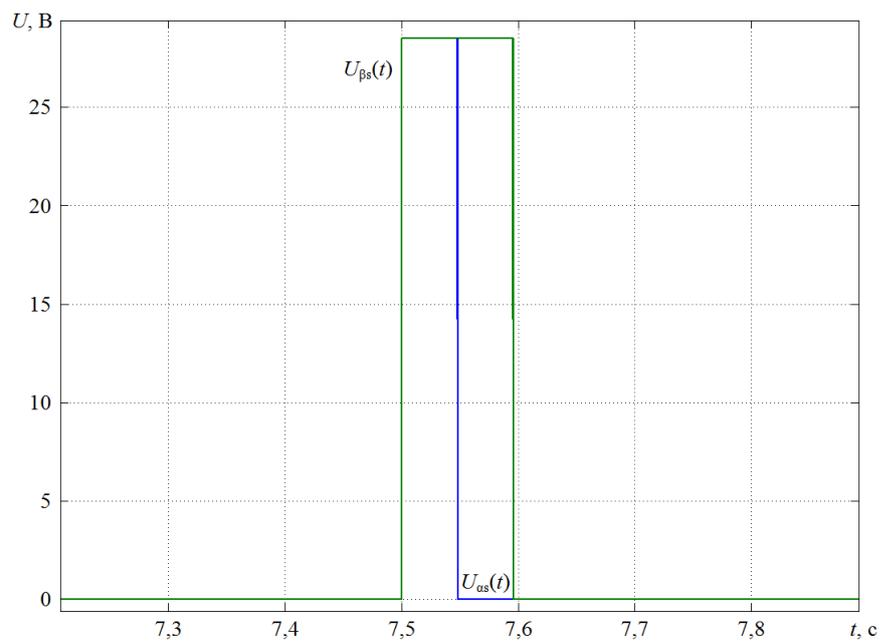


Рис. 4.31. Зависимости напряжений питания обмоток машины от времени при питании одной из обмоток постоянным током. Задний фронт

Питание машины подобным образом позволяет увеличить КПД примерно в 1,5 раза при незначительном снижении амплитуды перемещения (рис. 4.32 и 4.33).

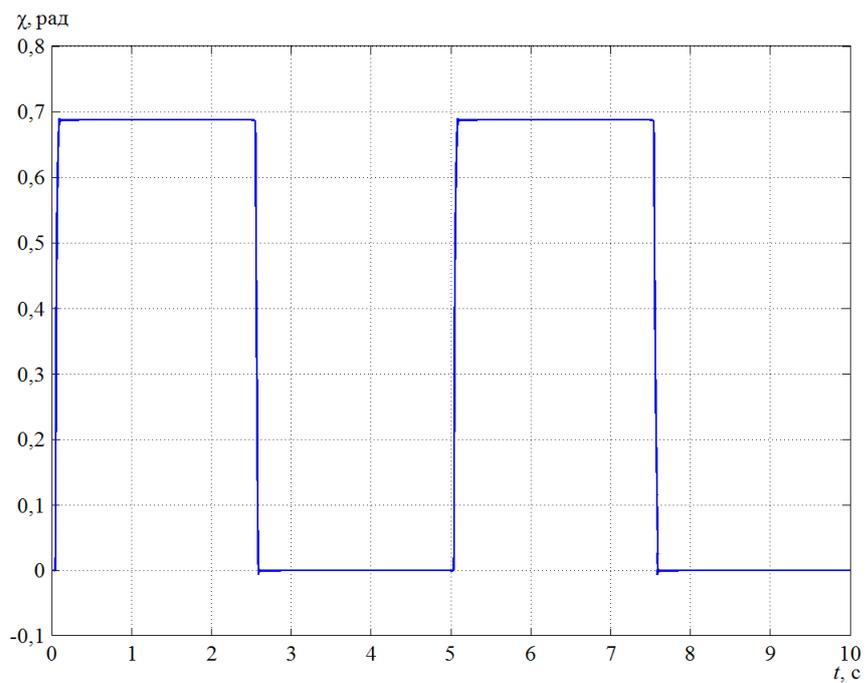


Рис. 4.32. Зависимость перемещения выходного элемента привода от времени при питании одной из обмоток постоянным током и отключении питания на время паузы

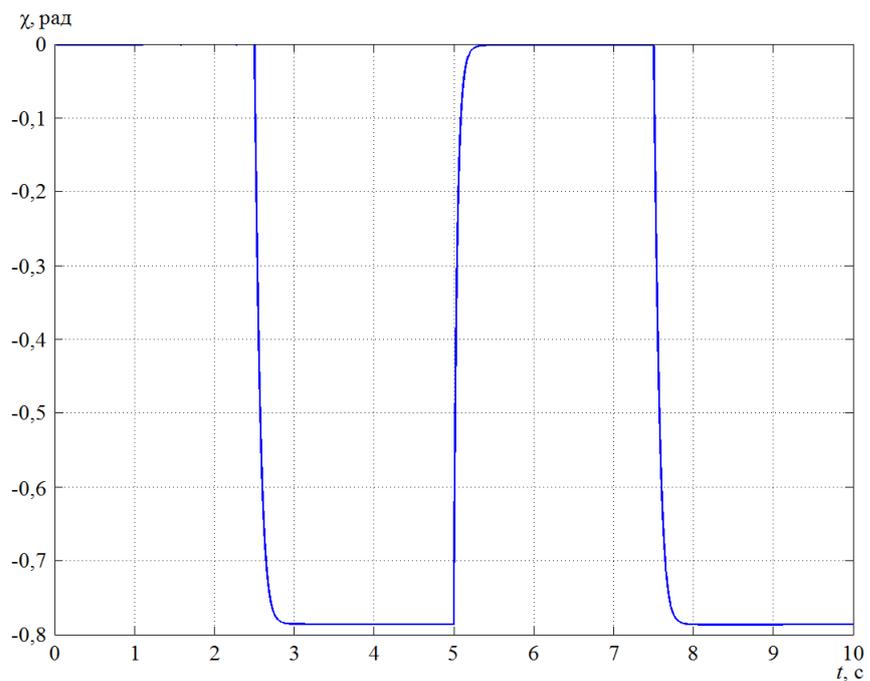


Рис. 4.33. Зависимость перемещения выходного элемента привода от времени при питании одной из обмоток постоянным током без отключения питания на время паузы

4.5. Выводы

1. Установлено, что в режиме ПТ наилучшие энергетические показатели обеспечиваются при малой нагрузке привода.
2. В режиме питания одной из обмоток АД от источника постоянного тока в электромагнитном моменте АД отсутствуют высокочастотные составляющие, присутствующие при питании обмоток АД напряжениями переменного тока.
3. Введение позиционной составляющей в нагрузку электропривода пульсирующего движения приводит к потере статической устойчивости, при этом режим работы привода становится колебательным.
4. КПД электропривода пульсирующего движения (во всех рассмотренных режимах) можно увеличить примерно в 1,5 раза, отключив на время паузы обе обмотки.

V. Экспериментальные исследования и результаты внедрения электропривода периодического движения

В разделе приведены результаты экспериментальных исследований электроприводов с пульсирующим законом движения на лабораторной и промышленной установках, для подтверждения адекватности разработанных методик расчёта выходных параметров электроприводов с пульсирующим законом движения и результатов имитационного моделирования при различных видах модуляции питающих напряжений.

5.1. Описание экспериментальной установки

На рис. 5.1 изображена функциональная схема, а на рис. 5.2 внешний вид экспериментальной установки, для питания АД от источников переменного тока с линейной фазовой или балансной амплитудной модуляцией питающих напряжений. В качестве экспериментального АД использовался двигатель АИР71А2, включенный по двухфазной схеме. Параметры экспериментального АД приведены в табл. 2.7.

Напряжение промышленной сети подаётся на одну из обмоток АД через лабораторный автотрансформатор Т1 (ЛАТР), который позволяет регулировать его величину. Другая обмотка АД питается от автономного инвертора напряжения (АИН), собранного по полумостовой схеме и синхронизированного с частотой сети. Для выпрямления сетевого напряжения на входе АИН и подавления пульсаций напряжения используется выпрямитель (В) со сглаживающим фильтром (СФ). Система управления (СУ) АИН управляет работой ключей VT1 и VT2. В качестве ключей АИН использовались MOSFET транзисторы IPW65R190CDFA [8], а в качестве драйверов ключей использовались микросхемы IR2110 [9]. Основу СУ АИН составляет цифровой сигнальный процессор (ЦСП) TMS320F28335 [11, 13], который генерирует широтно-модулированные сигналы управления ключами при помощи встроенных модулей ШИМ [15]. Питание обмотки АД

осуществляется через трансформатор Т2 и фильтр (Ф), подавляющий помехи, создаваемые ШИМ.

Тип модуляции задаётся системой управления, которая при помощи ШИМ, формирует напряжения необходимой формы для питания обмотки АД.

Положение вала двигателя определяется датчиком положения (ДП). В качестве датчика положения использовался инкрементный преобразователь угловых перемещений ЛИР-158Б с разрешающей способностью 40000 дискрет / оборот [71]. Сигналы ДП передаются в измерительный блок ИБ, который формирует аналоговые напряжения пропорциональные углу поворота χ , скорости поворота ω и угловому ускорению ε . По угловому ускорению, зная момент инерции нагрузки, можно косвенно судить об электромагнитном моменте АД.

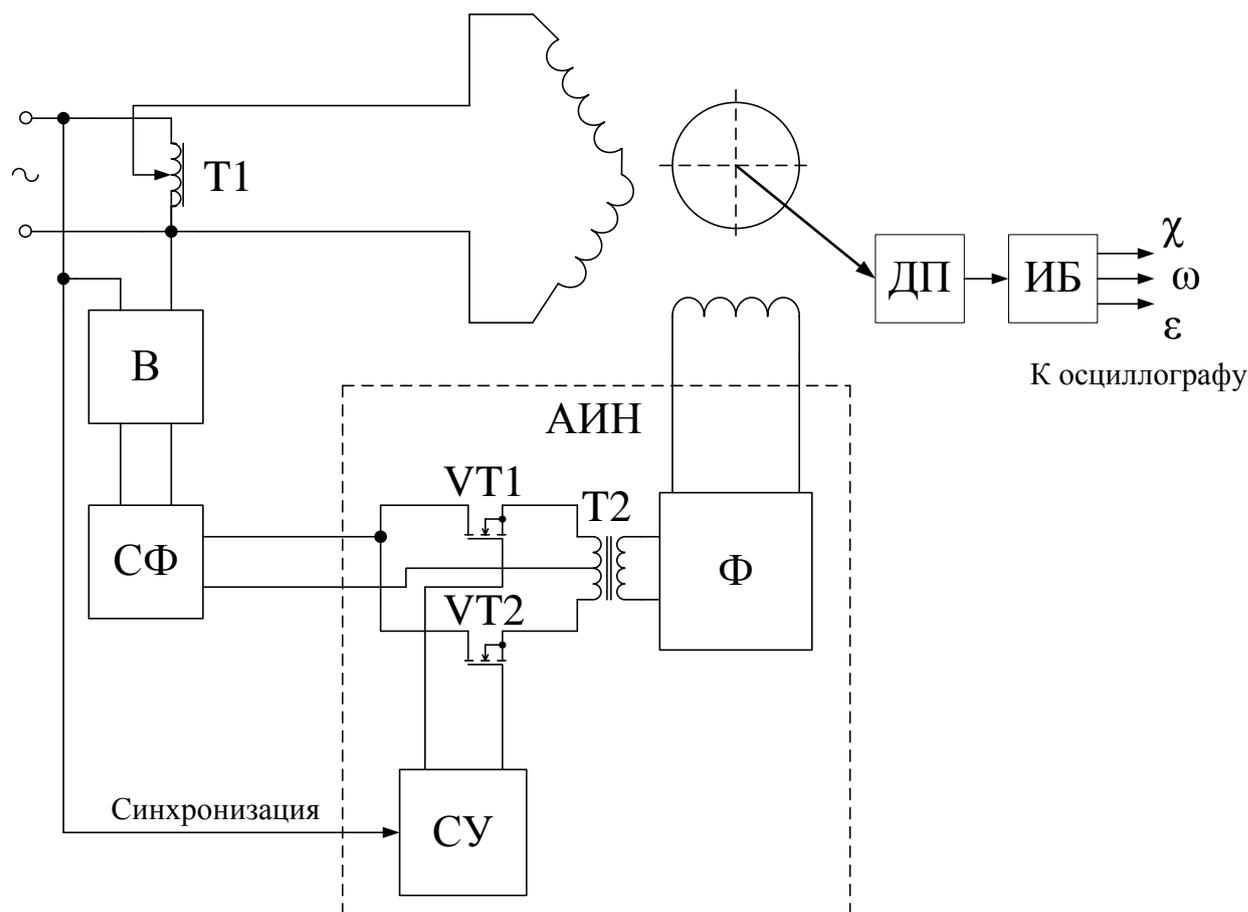


Рис. 5.1. Функциональная схема экспериментальной установки при питании АД от источников переменного напряжения

Для имитации статического момента нагрузки к валу АД присоединялся генератор. Момент инерции нагрузки изменялся при помощи установки дополнительных колец на вал двигателя.

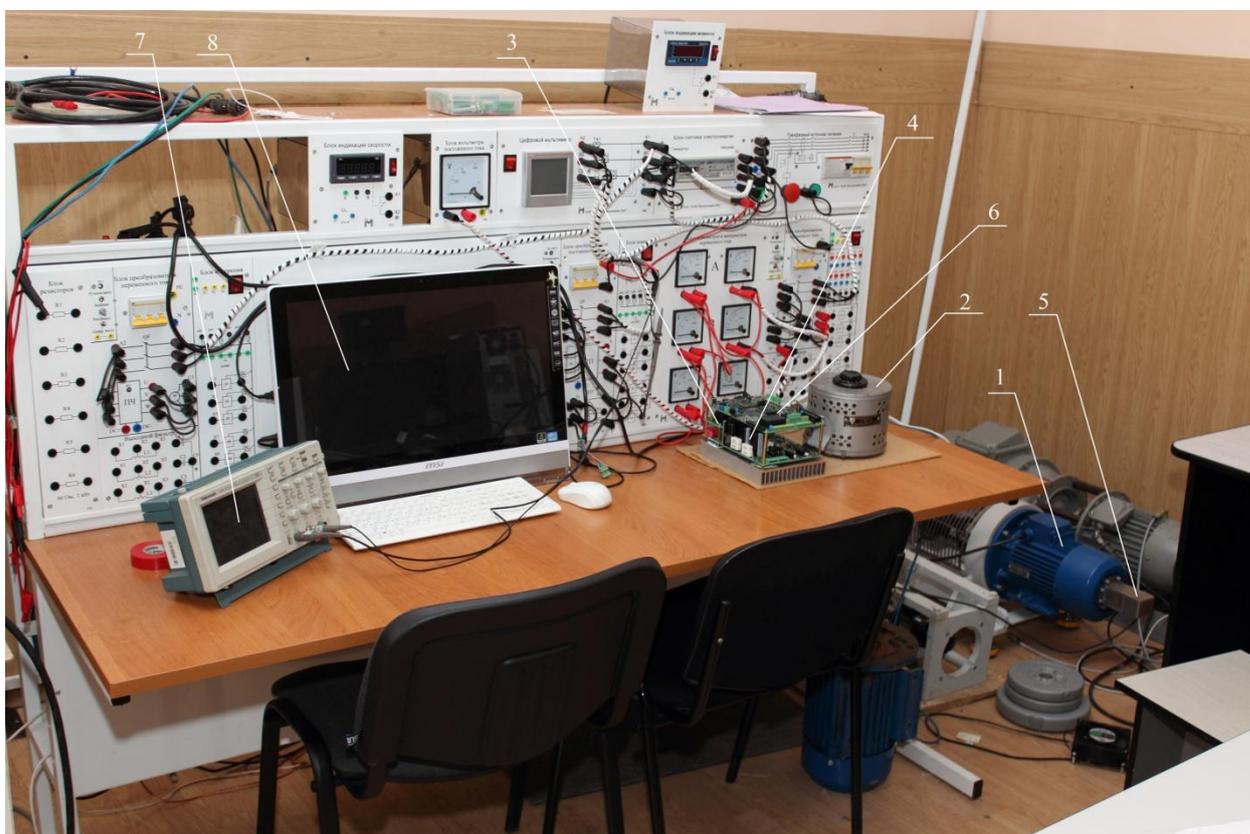


Рис. 5.2. Экспериментальная установка. На фотографии цифрами обозначены: 1 – АД; 2 – ЛАТР; 3 – выпрямитель (В) вместе со сглаживающим фильтром (СФ); 4 – АИН; 5 – ДП; 6 – ИБ; 7 – осциллограф; 8 – ПК.

Функциональная схема ИБ приведена на рис. 5.3. Датчик положения ЛИР-158Б подключен к модулю обработки сигнала перемещения [16] ЦСП TMS320F28335. ЦСП осуществляет численное дифференцирование входного сигнала перемещения и при помощи модулей ШИМ [15] формирует выходные сигналы χ , ω и ϵ . RC-цепочки R1C1, R2C2, R3C3 используются для подавления помех создаваемых ШИМ.

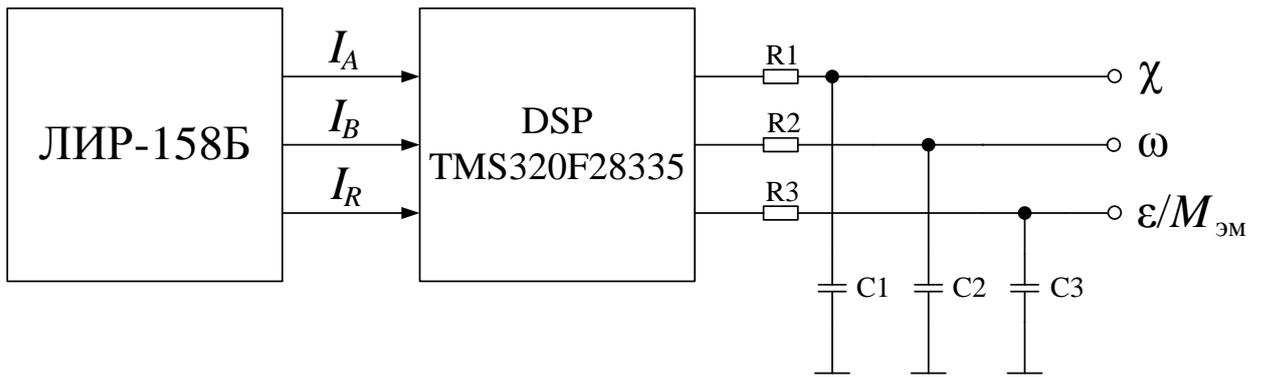


Рис. 5.3. Функциональная схема блока измерения перемещения, скорости, ускорения

На рис. 5.4 представлена функциональная схема экспериментальной установки, реализующая фазовой способ формирования пульсирующего режима работы асинхронного двигателя при питании одной из его обмоток напряжением постоянного тока. ЛАТР Т используется для понижения напряжения промышленной сети. Исполнительный двигатель питается от источника постоянного напряжения (ПН) через выпрямитель и сглаживающий фильтр. Питание другой обмотки АД осуществляется через коммутатор (К), работой которого управляет система управления (СУ). Питание третьей обмотки АД осуществляется через коммутатор (К), работой которого управляет система управления (СУ).

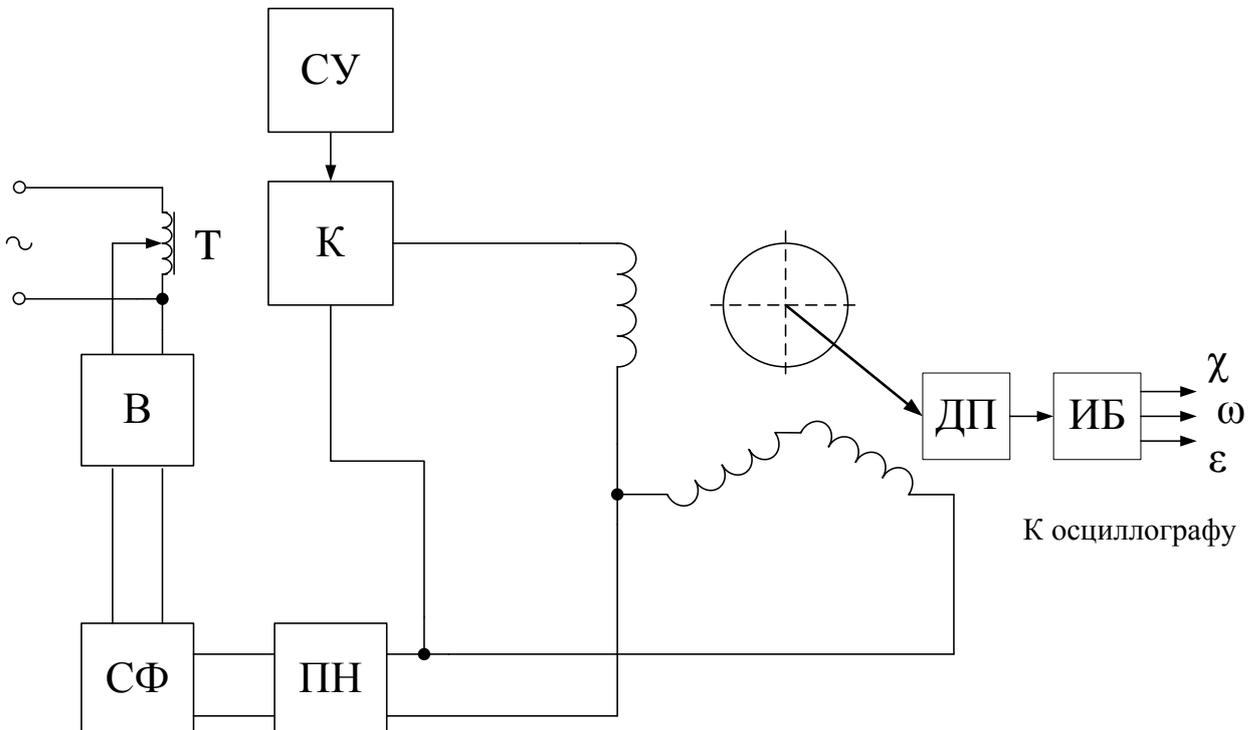


Рис. 5.4. Функциональная схема экспериментальной установки при питании АД от источников постоянного напряжения

Макет преобразователя напряжения рис. 5.5 создан на базе штатного силового модуля производства АО «НПЦ «Полус», система управления которого была заменена микропроцессорной.

Преобразователь напряжения выполнен по схеме понижающего преобразователя рис. 3.4. В качестве силовых ключей были использованы MOSFET транзисторы IRFP4668PBF [10], в качестве драйверов ключей микросхемы IR2110 [9]. Система управления выполнена на базе ЦСП TMS320F28335 [13] в составе тестовой платы TMDSDOCK28335 [12, 14]. В качестве датчиков тока были использованы датчики на основе эффекта холла LTS 25-NP [18].

Приборы, применявшиеся при экспериментах, соответствуют нормам точности и прошли все необходимые поверки. Для снятия осциллограмм использовался осциллограф Tektronix TDS 2024C [28]. Для обработки результатов экспериментов и построения графиков использовался пакет MATLAB [19].

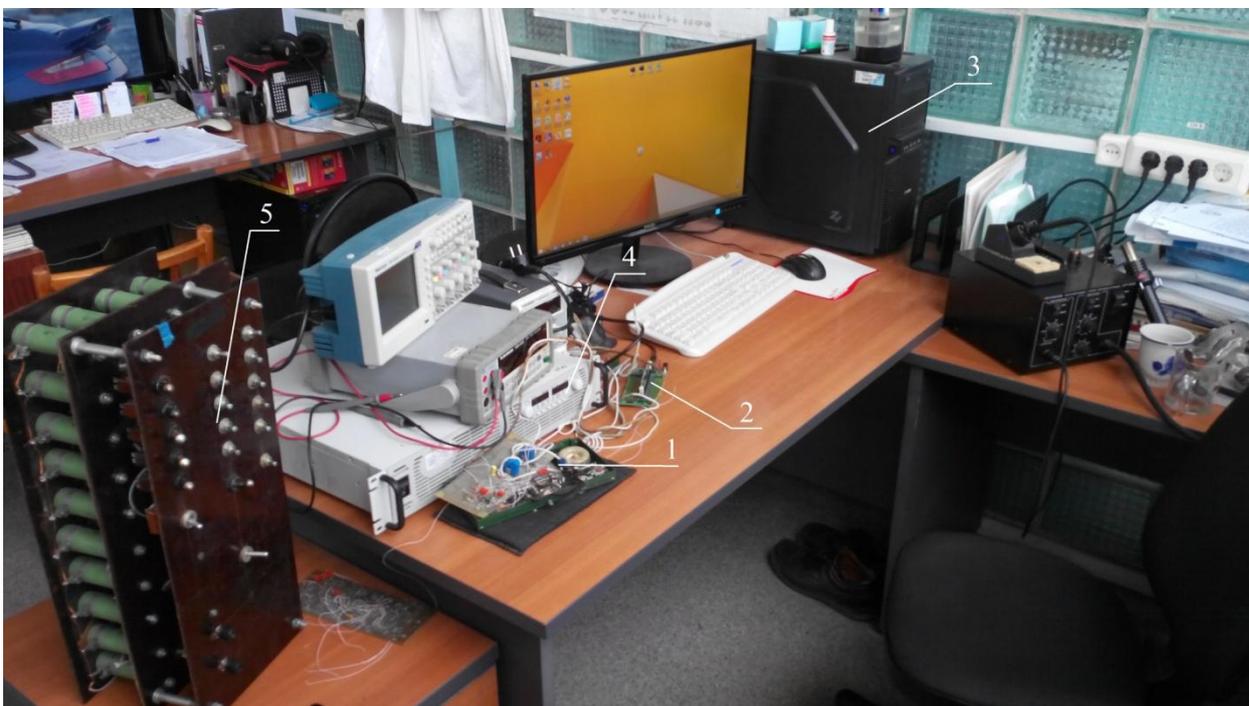


Рис. 5.5. Макет преобразователя. На фотографии цифрами обозначены: 1 – ПН; 2 - тестовая плата TMDSDOCK28335; 3 – ПК; 4 – источник питания; 5 – нагрузка.

При отработке микропроцессорной системы управления было создано программное обеспечение для управления преобразователем напряжения, реализующее следующие алгоритмы:

- Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.
- Управление по балансу необходимой и накопленной в системе энергии [2, 83] с коррекцией индуктивности.
- Управление по балансу необходимой и накопленной в системе энергии с ШИМ [73].

Сравнительный анализ алгоритмов управления показал, что самым лучшим, с точки зрения переходных процессов, является управление по балансу необходимой и накопленной в системе энергии. Ниже представлены осциллограммы работы преобразователя при управлении по этому алгоритму.

5.2. Результаты экспериментальных исследований и их анализ

На рис. 5.6, 5.7 и 5.8 представлены осциллограммы закона движения χ , угловой скорости ω и углового ускорения ε при фазовой (рис. 5.6), амплитудной (рис. 5.7) модуляциях питающих напряжений, а так же при питании одной из обмоток АД постоянным током (рис. 5.8). Они сняты при запуске АД на частоту $\Omega = 2\pi$ рад / с и следующих параметрах нагрузки: $L_{\text{мех}} = 0,002$ кг·м², $R_{\text{мех}} = 0,02$ кг·м² / с, при $M_{\text{тр}} = 0$, $C_{\text{мех}} = 0$.

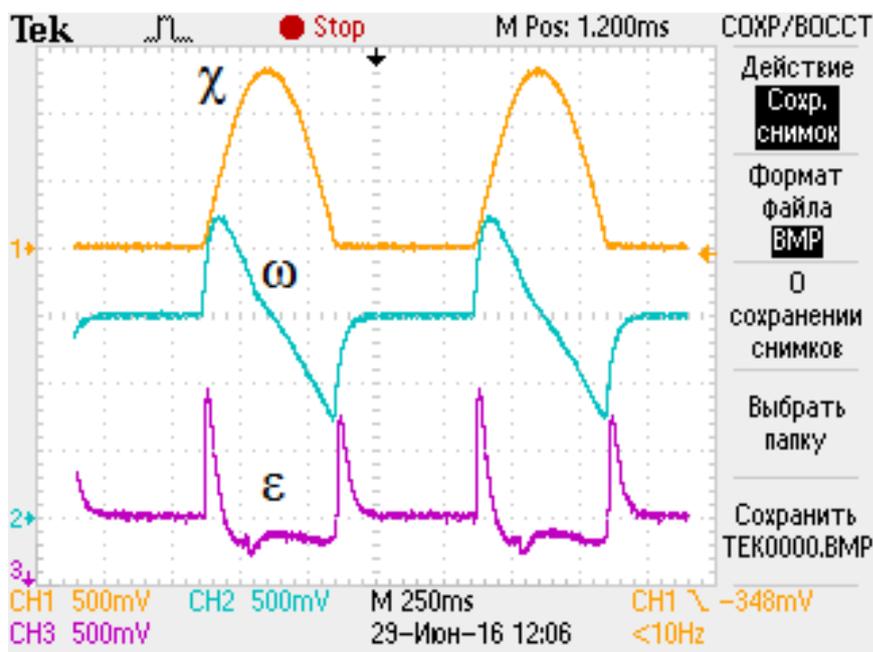


Рис. 5.6. Осциллограммы перемещения χ , скорости ω и ускорения ε АД при фазовой модуляции питающих напряжений

В случае фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений осциллограммы практически идентичны. Выходной элемент АД совершает пульсирующие движения в соответствии с заданным законом.

При питании одной из обмоток АД постоянным током выходной элемент двигателя также совершает пульсирующие движения, но на законе движения сказывается то, что электромагнитный момент возникает на короткое время в течение полупериода, а затем становится равным нулю. Поэтому вид закона движения сильно зависит от момента инерции нагрузки, что обуславливает его отклонение от прямоугольного.

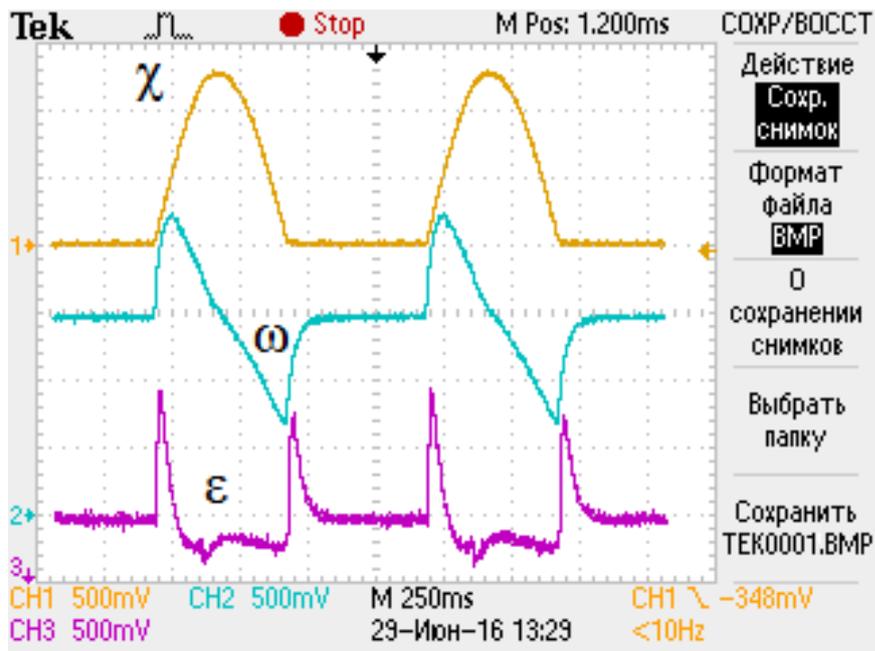


Рис. 5.7. Осциллограммы перемещения χ , скорости ω и ускорения ε АД при амплитудной модуляции фазных напряжений

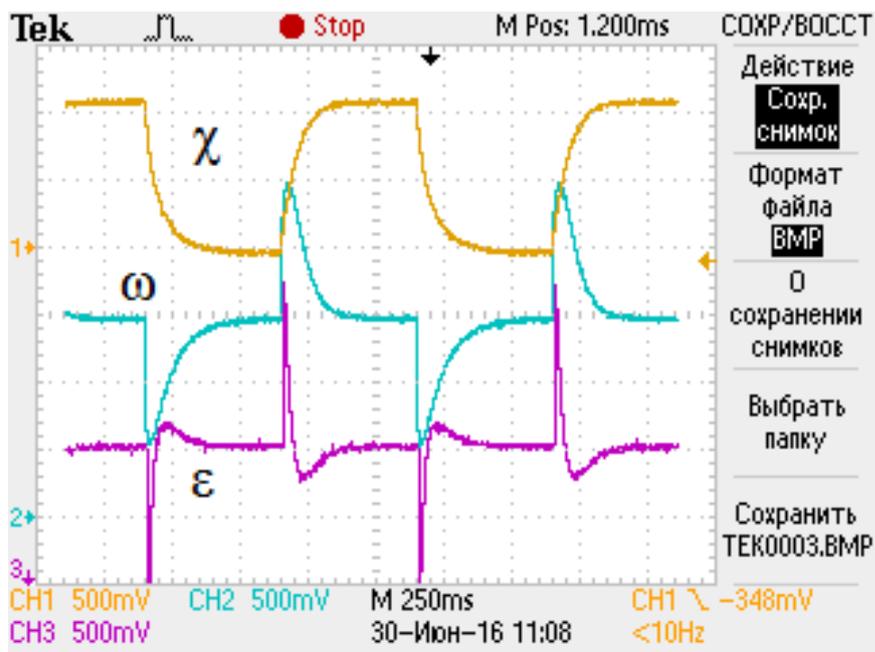


Рис. 5.8. Осциллограммы перемещения χ , скорости ω и ускорения ε при питании одной из обмоток АД постоянным током

На рис. 5.9 представлены зависимости амплитуды закона движения подвижного элемента привода от момента инерции нагрузки при питании АД от источников с линейной фазовой (ФМ) и балансной амплитудной (АМ) модуляциями, а так же при питании одной из обмоток АД от источника постоянного напряжения (ПТ).

В режимах ФМ и АМ амплитуда пульсаций снижается при увеличении момента инерции нагрузки, так как динамический момент, обусловленный моментом инерции, всегда направлен в сторону противоположную угловому ускорению. В режиме ПТ момент инерции способствует накоплению механической энергии в подвижном элементе привода, что способствует увеличению амплитуды пульсаций, но сильно искажает вид закона движения. Это обстоятельство существенно, так как электромагнитный момент на полупериоде действует очень незначительное время.

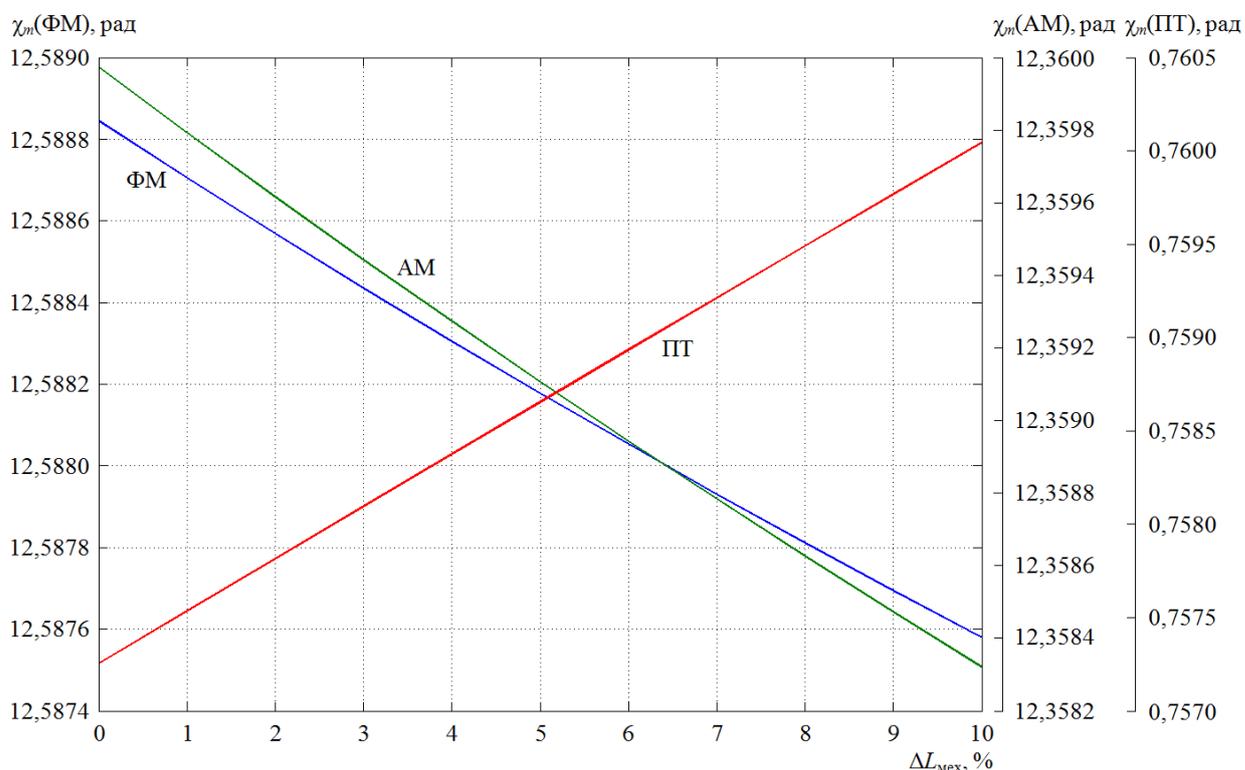


Рис. 5.9. Зависимость амплитуды пульсаций χ_m от отклонения инерционной нагрузки от номинального значения

На рис. 5.10, 5.11 показаны регулировочные характеристики, устанавливающие взаимосвязь между амплитудой закона движения подвижного элемента привода и напряжениями источников питания АД. В режимах ФМ и АМ электромагнитный момент, развиваемый АД растёт пропорционально квадрату напряжения питания, что приводит к увеличению амплитуды пульсаций закона движения. В режиме ПТ амплитуда пульсаций так же растёт, асимптотически приближаясь к некоторому значению. Замедление роста амплитуды пульсаций (рис. 5.11) связано с тем, что

длительность действия электромагнитного момента мало зависит от величины напряжения питания. А рост напряжения питания приводит лишь к увеличению электромагнитного момента, что не так существенно.

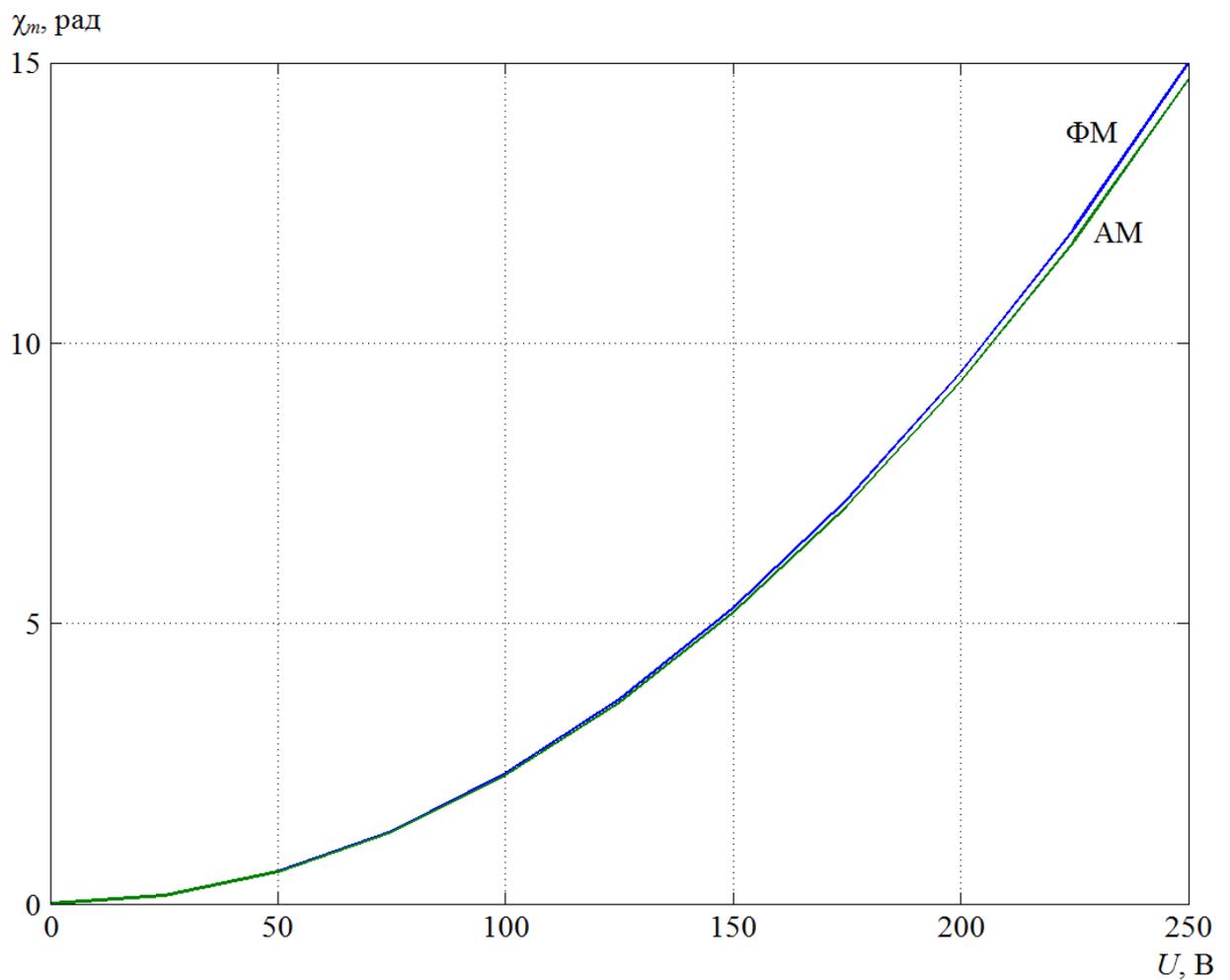


Рис. 5.10. Регулировочные характеристики при питании АД переменным напряжением при запуске на частоту $\Omega = \pi$ рад / с

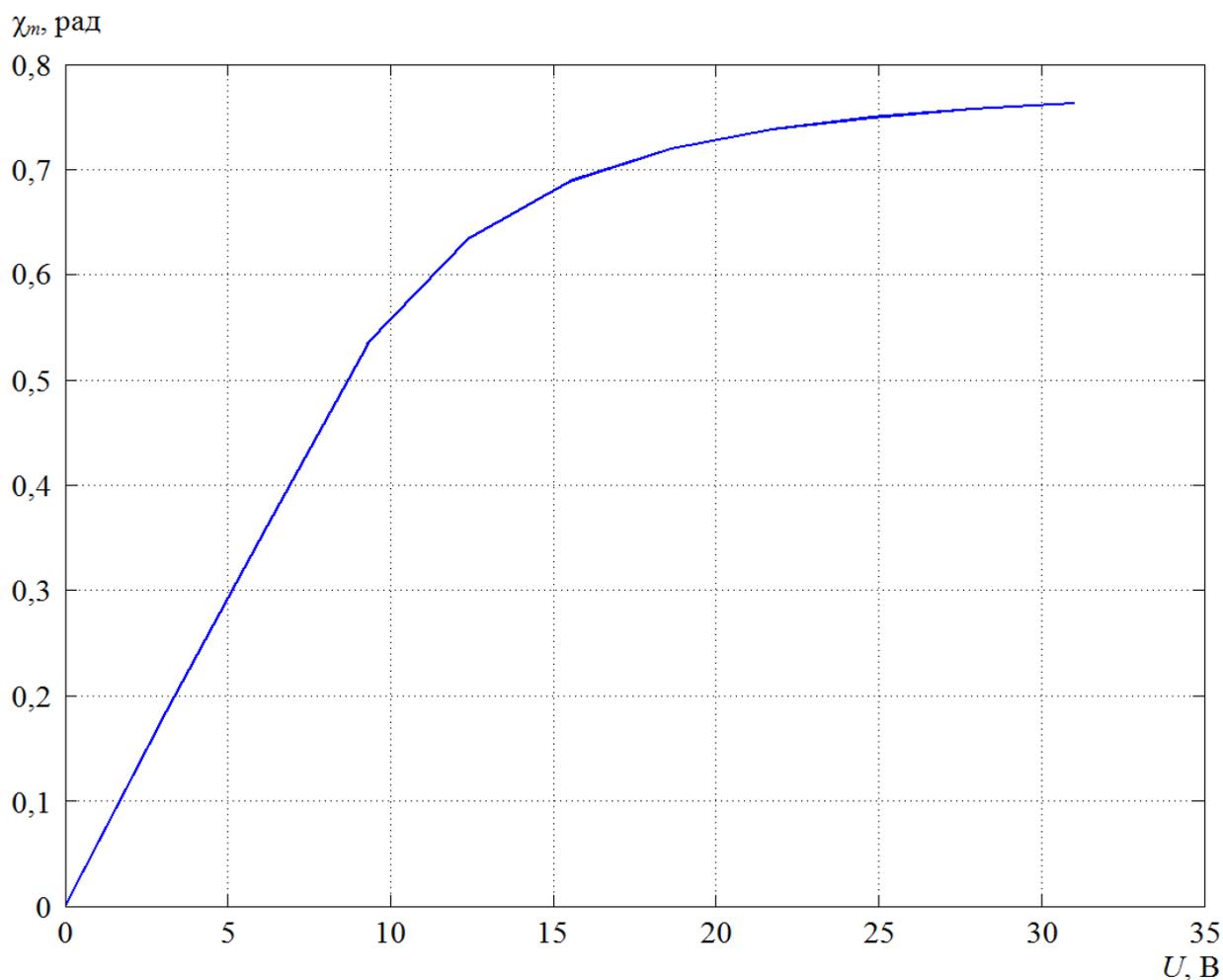


Рис. 5.11. Регулировочные характеристики при питании АД постоянным напряжением при запуске на частоту $\Omega = \pi$ рад / с

На рис. 5.12 представлены амплитудно-частотные характеристики исследуемого электропривода. Как видно, с увеличением частоты пульсаций амплитуда уменьшается во всех режимах, что характерно для всех асинхронных электроприводов, работающих в режиме вынужденных колебаний. Различный характер уменьшения амплитуды в режиме ПТ и в режимах ФМ и АМ объясняется тем, что в режимах ФМ и АМ электромагнитный момент действует на всём полупериоде, а в режиме ПТ только в начале и в конце. При работе АД в режиме ПТ с небольшой частотой пульсаций, частота не оказывает существенного влияния на амплитуду потому, что импульс электромагнитного момента используется только для разгона нагрузки привода, тогда как при больших частотах пульсаций импульс электромагнитного момента используется как для разгона, так и для торможения нагрузки привода.

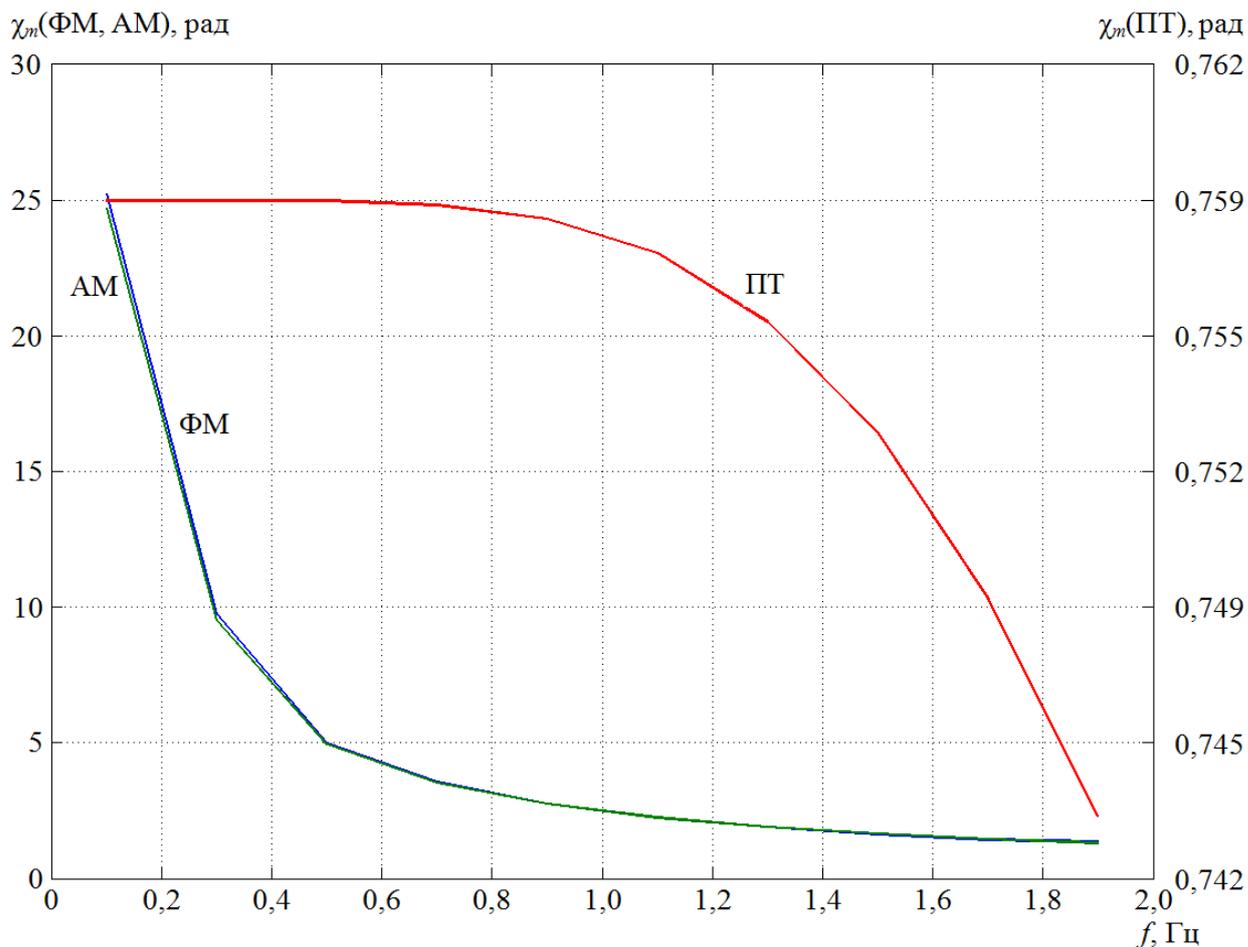


Рис. 5.12. Амплитудно-частотные характеристики при $L_{\text{мех}} = 0,002 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$,
 $R_{\text{мех}} = 0,02 \text{ кг}\cdot\text{м}^2 / \text{с}$

Вид регулировочных характеристик в режиме ПТ сильно отличается от вида аналогичных характеристик режимов ФМ и АМ. Эти отличия, в основном, обусловлены длительностью действия электромагнитного момента в течение активного полупериода. В режиме ПТ электромагнитный момент действует короткое время в начале и конце полупериода, тогда как в режимах ФМ и АМ электромагнитный момент отличен от нуля на протяжении всего полупериода (рис. 5.6, 5.7, 5.8).

С целью оценки динамических свойств НП, работающего в составе асинхронного электропривода пульсирующего движения, было проведено ряд исследований, подтверждающих его работоспособность в различных режимах работы. Так на рис. 5.13 представлена осциллограмма выходного напряжения ПН при включении с нулевых начальных условий. Выход на

рабочий режим с установлением напряжения нагрузки на уровне $28,500 \pm 0,025$ В происходит в течении 50 мс.



Рис. 5.13. Выходное напряжение ПН при включении ($U_{вх} = 32$ В)

Такой режим включения преобразователя крайне нежелателен, так как при резком включении развиваются огромные токи, которые перегружают силовые ключи и конденсатор фильтра, вводят в насыщение дроссель. Для организации плавного запуска в корректор индуктивности алгоритма управления по балансу энергии закладывается на несколько порядков большее начальное значение индуктивности фильтра, за счёт этого система управления не позволяет развиться большим токам при запуске. Спустя некоторое время корректор индуктивности определит истинное значение индуктивности фильтра, и преобразователь выйдет на рабочий режим.

На рис. 5.14 представлена осциллограмма 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.

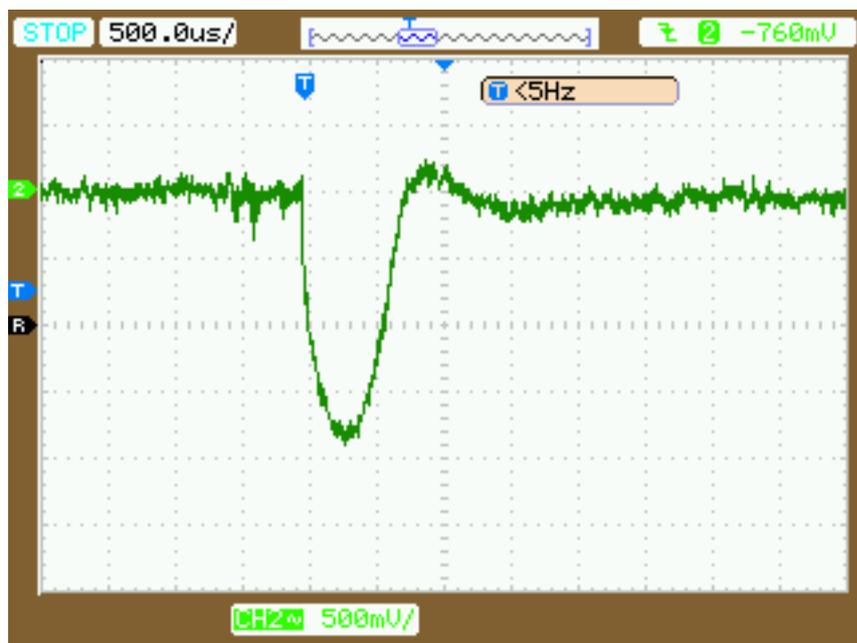


Рис. 5.14. Выходное напряжение ПН при резком увеличении (набросе) нагрузки с 2 до 10 А ($U_{вх} = 32$ В)

На рис. 5.15 представлена осциллограмма выходного напряжения преобразователя при резком снижении нагрузки с 10 до 2 А.



Рис. 5.15. Выходное напряжение ПН при резком уменьшении (сбросе) нагрузки с 10 до 2 А ($U_{вх} = 32$ В)

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 (рис. 5.14) заканчивается, когда избыток энергии фильтра будет израсходован нагрузкой.

5.3. Практические разработки и применение электроприводов с пульсирующим законом движения

Проведённые теоретические исследования позволили выработать технические предложения и наметить пути улучшения энергетических характеристик электроприводов периодического движения, расширить диапазон применения двухфазных асинхронных электродвигателей.

Способ получения пульсирующего движения был реализован в установке перемешивания жидких реагентов на предприятии ООО «Сибметакхим», г. Томск. Преобразователь напряжения и способ управления им реализован на предприятии АО «НПЦ «Полюс», г. Томск. Реализация результатов работы на предприятиях подтверждена соответствующими актами внедрения.

Функциональная схема электропривода установки перемешивания представлена на рис. 5.16. Напряжения промышленной сети с частотой f_1 поступает на обмотку АД и задающий генератор (ЗГ), синхронизированный с частотой сети. На вход ЗГ поступает задающий сигнал частоты пульсаций, который затем складывается с частотой сети f_1 :

$$f_2 = f_1 + f_{п};$$

и поступает в автономный инвертор напряжения (АИН), куда, так же поступает сигнал формирователя пульсаций (ФП).

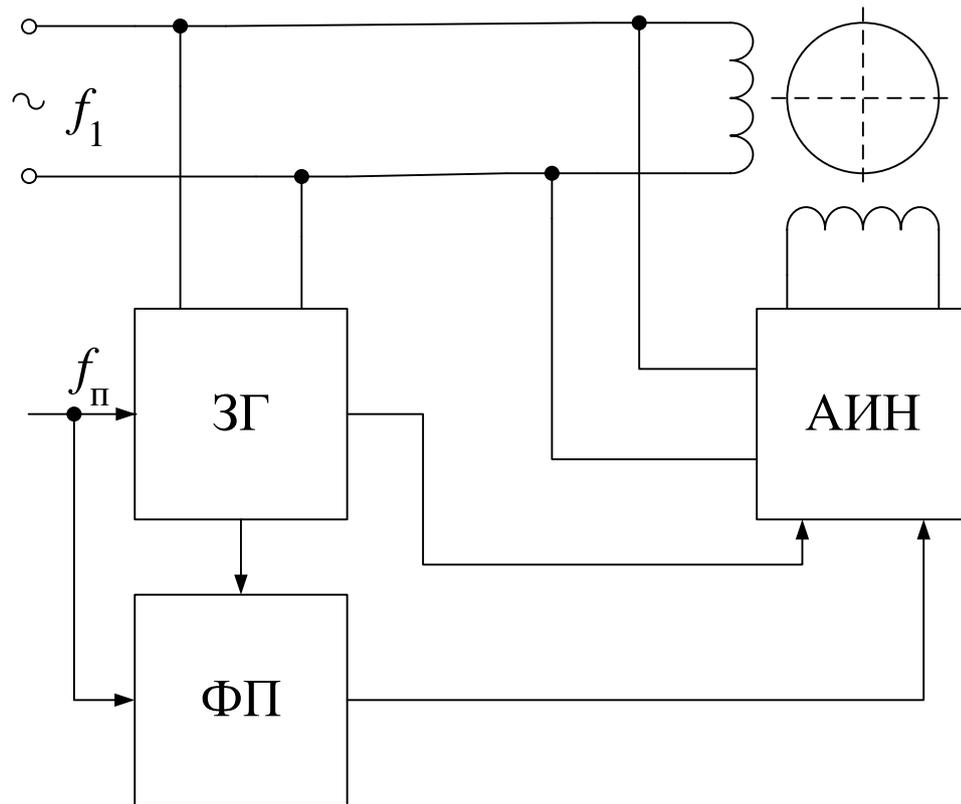


Рис. 5.16. Функциональная схема электропривода с пульсирующим законом движения

АИН управляется блоками ЗГ и ФП и преобразовывает сетевое напряжение с частотой f_1 в напряжение с частотой f_2 для питания второй обмотки АД. Таким образом, осуществляется питание двухфазного АД от источников напряжения с линейной фазовой модуляцией согласно закону:

$$U_{as} = U_{m2} \sin(\omega_2 t),$$

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

где U_{m1} , U_{m2} – амплитуды питающих напряжений; $\omega_1 = 2\pi f_1$, $\omega_2 = 2\pi f_2$ – частоты питающих напряжений; $\Omega = \omega_2 - \omega_1$ – частота пульсаций;

$$A(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)\Omega t)}{2k-1}.$$

Для повышения КПД электроприводов с пульсирующим законом движения было предложено изменить способ задания питающих напряжений для всех трёх режимов работы (ФМ, АМ и ПТ), а именно отключать от источников питания обе обмотки на время полупериода, когда двигатель не совершает движения в соответствии с (табл. 5.1).

Таблица 5.1

| Закон управления | Питающие напряжения | Улучшение энергетических характеристик |
|---------------------------------|--|---|
| Линейная фазовая модуляция | $U_{as} = U_{m1} \cos(\omega_1 t) A(t)$ $U_{\beta s} = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \gamma)$ | $U_{as} = U_{m1} \cos(\omega_1 t) A(t)$ $U_{\beta s} = U_{m2} \sin(\omega_2 t + \gamma) A(t)$ |
| Балансная амплитудная модуляция | $U_{as} = U_{m1} \sin(\omega_1 t) \cos(\Omega t)$ $U_{\beta s} = U_{m2} \cos(\omega_1 t) A(t)$ | $U_{as} = U_{m1} \sin(\omega_1 t) \cos(\Omega t) A(t)$ $U_{\beta s} = U_{m2} \cos(\omega_1 t) A(t)$ |

Во время паузы никакая механическая работа не производится, а подключенная обмотка продолжает потреблять электроэнергию. Отключая обмотки на время паузы можно снизить потребление электроэнергии в 1,5 – 2 раза.

Кроме того установлено, что в режиме ПТ, который является частным случаем режима ФМ (при $\gamma = \pi / 2$ и $\omega_1 = \omega_2 = 0$) важен только фронт пульсирующего напряжения питания, так как именно тогда возникает электромагнитный момент (рис. 5.11). Воспроизводя поочередно то передний, то задний фронт питающего напряжения (рис. 4.30, 4.31) можно воспроизвести пульсирующее движение, при существенно меньших затратах электроэнергии.

С целью расширения функциональных возможностей электроприводов с пульсирующим законом движения были предложены способы управления двухфазным АД, защищенные патентами на полезные модели [35, 36].

На рис. 5.17 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.

Синусоидальное напряжение частоты пульсаций $f_{\text{п}}$ с выхода задающего генератора ЗГ поступает на вход однополупериодного выпрямителя В, где преобразуется в однополярное напряжение, знак которого определяется опорным сигналом. С выхода выпрямителя В сформированное напряжение поступает на вход сглаживающего фильтра СФ, где осуществляется сглаживание пульсаций напряжения. В результате на выходе сглаживающего

фильтра формируются постоянное напряжение, которое усиливается по мощности первым инвертором напряжения ИН1 и подаётся на обмотку возбуждения АД. Одновременно, выходное напряжение выпрямителя подают на вход второго инвертора напряжения ИН2 который питает обмотку управления АД.

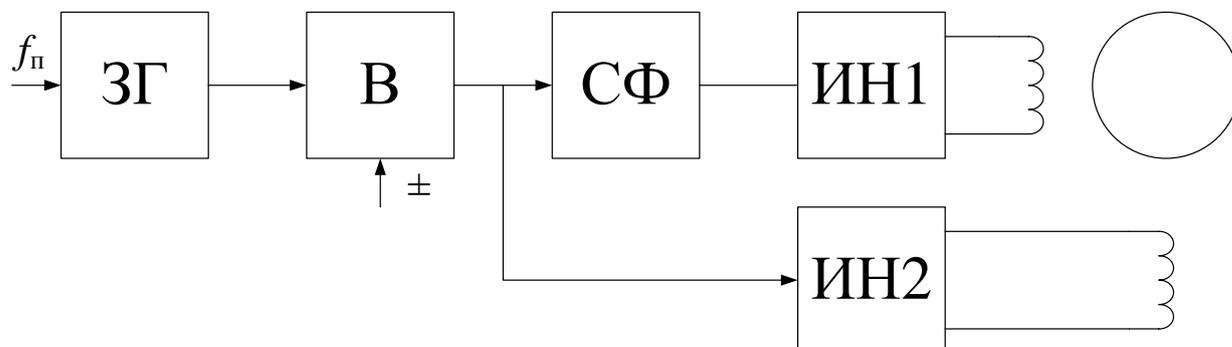


Рис. 5.17. Блок схема устройства для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме пульсирующего движения. Патент РФ 130157

Регулирование выходных параметров, а именно частоты пульсаций, осуществляют за счет изменения частоты задающего генератора, а амплитуды момента, скорости или координаты – за счет регулирования коэффициента передачи инвертора. Изменение направления движения осуществляется за счет изменения знака выходного напряжения, снимаемого с выпрямителя.

На рис. 5.18 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.

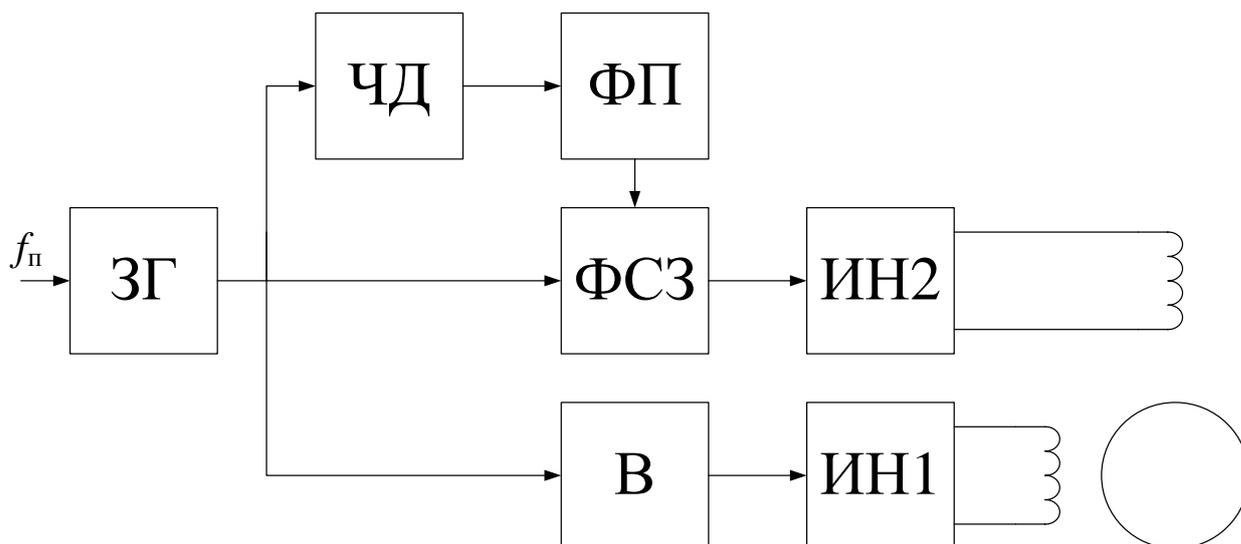


Рис. 5.18. Блок схема устройства для управления двухфазным асинхронным двигателем в режиме пульсирующего движения. Патент РФ 133990

Устройство работает следующим образом. Напряжение частоты пульсаций f_n с задающего генератора ЗГ поступает на вход однополупериодного выпрямителя В, где оно преобразуется в однополярное. С выхода однополупериодного выпрямителя напряжение поступает на вход первого инвертора напряжения ИН1 и, усиливаясь по мощности питает обмотку возбуждения АД. Одновременно выходное напряжение с задающего генератора поступает на вход частотного демодулятора ЧД и первый вход фазосдвигающего звена ФСЗ. С выхода частотного демодулятора снимается постоянное напряжение, величина которого пропорциональна частоте пульсаций. Полученное напряжение поступает на вход функционального преобразователя ФП где оно преобразуется в сигнал пропорциональный квадрату частоты пульсаций и подается на второй вход регулируемого фазосдвигающего звена. В результате выходное напряжение регулируемого фазосдвигающего звена сдвигается при регулировании частоты пульсаций по фазе относительно выходного напряжения задающего генератора, что обеспечивает компенсацию динамического смещения нейтрали пульсаций. Полученное напряжение с выхода регулируемого фазосдвигающего звена усиливается по мощности вторым инвертором напряжения ИН2, который питает обмотку управления АД.

Для проверки соответствия данных, полученных при помощи имитационного моделирования, сравним их с результатами экспериментального исследования рис. 5.19, 5.20.

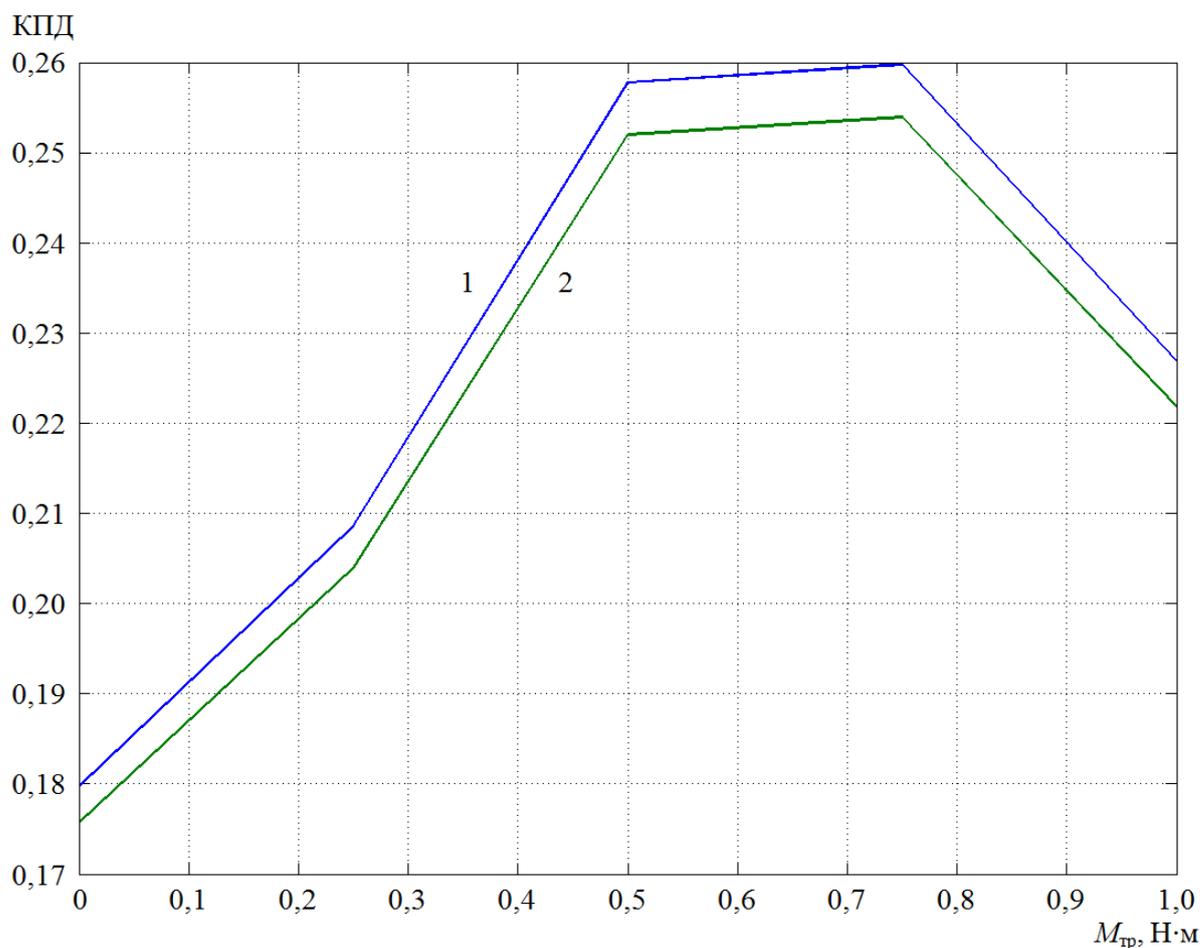


Рис. 5.19. Зависимость КПД привода от момента трения нагрузки: 1 – результаты экспериментального исследования; 2 – результаты имитационного моделирования

На рис. 5.19 представлены зависимости КПД от момента трения нагрузки привода. Разница между расчётным и экспериментальным значением не превышает 3 %.

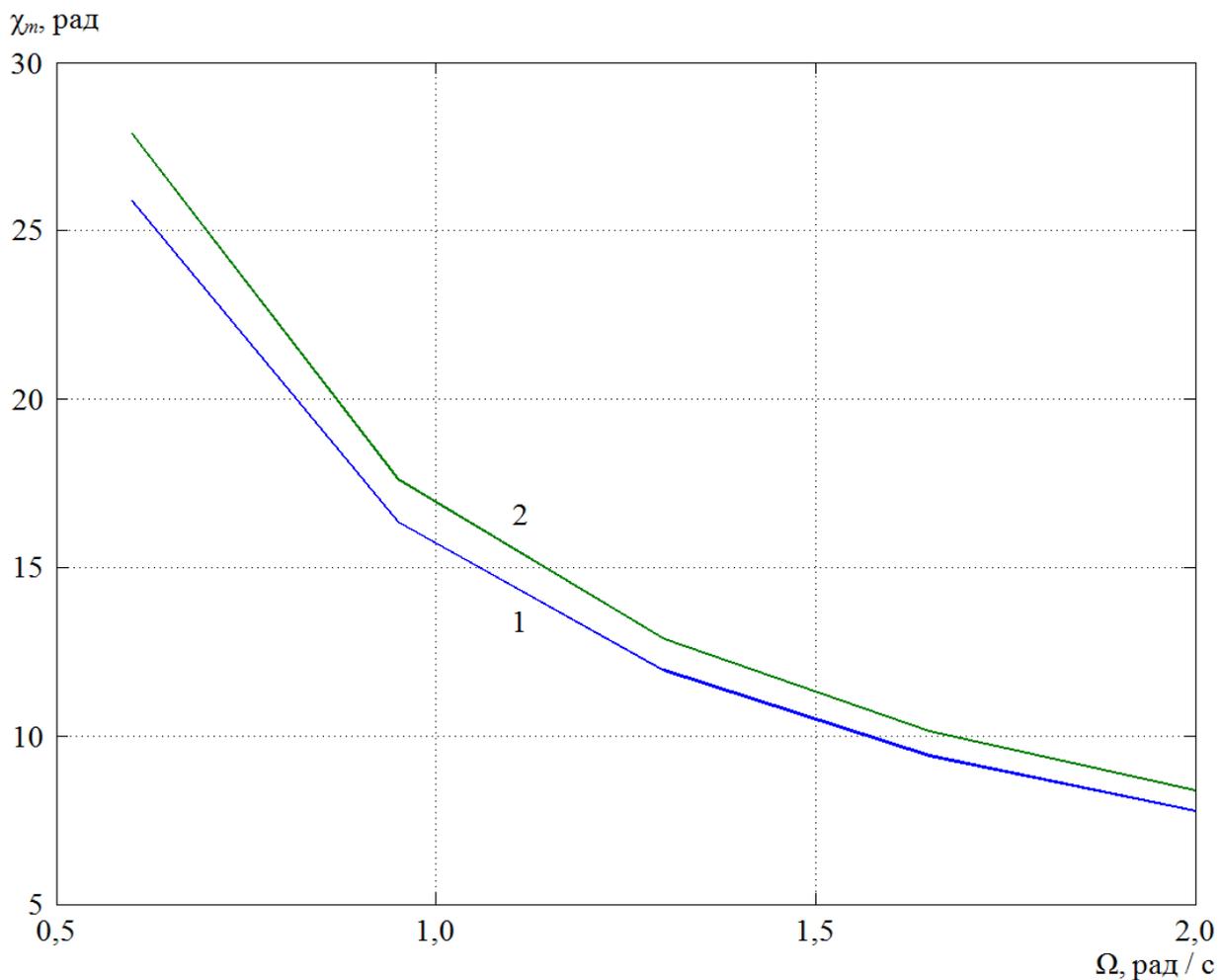


Рис. 5.20. Зависимость амплитуды пульсаций от частоты: 1 – результаты экспериментального исследования; 2 – результаты имитационного моделирования

На рис. 5.20 представлены зависимости амплитуды пульсаций от частоты. Расхождения между экспериментальными и расчётными данными не превышает 7,5 %, что ещё раз позволяет рекомендовать полученную методику расчёта выходных параметров электропривода с пульсирующим законом движения для практического использования.

5.4. Выводы

1. Разработана экспериментальная установка электропривода с пульсирующим законом движения, позволяющая проверить адекватность результатов теоретического анализа, методик расчета и математического моделирования, а также проводить самостоятельные исследования асинхронных электроприводов, работающих в специальных режимах.
2. Разработан преобразователь напряжения для питания электропривода с пульсирующим законом движения и алгоритм управления им, позволяющий минимизировать время переходных процессов.
3. Найдены новые технические решения, позволяющие расширить эксплуатационные возможности двухфазных асинхронных двигателей, работающих непосредственно в режиме пульсирующего движения защищенные патентами на полезные модели.
4. Расхождение расчётных и экспериментальных данных не более чем на 7,5 % позволяет рекомендовать полученные аналитические выражения для анализа и синтеза выходных характеристик электроприводов с пульсирующим законом движения при инженерных расчетах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщив выводы, сделанные в отдельных главах, в заключении отметим 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Electronic Warfare and Radar Systems Engineering : handbook. Washington : Naval Air Warfare Center, 1999.
2. Aristov A. V., Nagorniy V. O., Gavrilov A. M. Voltage converter with the controlled energy balance for the electric drive with the pulsation motion mode // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference on, 2015.
3. Dormand J. R. Numerical Methods for Differential Equations: A Computational Approach. Boca Raton : CRC Press, 1996.
4. Marchesini Group: Blister packaging machines. URL: <http://www.marchesini.com/machines-lines/macro-categories/powder-solid/blister-packaging-machines/> (дата обращения: 17.06.2016).
5. Marchesini Group: Blister packaging machines - MB421 - Product detail. URL: http://www.marchesini.com/machines-lines/macro-categories/powder-solid/product-detail/?tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bcat%5D=33&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bprod_id%5D=66&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Btab%5D=facts (дата обращения: 17.06.2016).
6. Marchesini Group: Blister packaging machines - MB451 Evolution - Product detail. URL: http://www.marchesini.com/machines-lines/macro-categories/powder-solid/product-detail/?tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bcat%5D=33&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bprod_id%5D=168&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Btab%5D=facts (дата обращения: 17.06.2016).
7. Marchesini Group: Blister packaging machines - MB460 - Product detail. URL: http://www.marchesini.com/machines-lines/macro-categories/powder-solid/product-detail/?tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bcat%5D=33&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Bprod_id%5D=168&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Btab%5D=facts

- [Vprod_id%5D=64&tx_mgsolutionproduct_pi4%5Btab%5D=facts](#) (дата обращения: 17.06.2016).
8. IPW65R190CFDA – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. URL: http://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPX65R190CFDA-DS-v02_00-en.pdf?fileId=db3a3043399628450139afa2346920a1 (дата обращения: 05.07.2016).
9. IR2110 – High and low side driver. URL: <http://www.infineon.com/dgdl/ir2110.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c80333167e> (дата обращения: 05.07.2016).
10. IRFP4668PbF – HEXFET Power MOSFET. URL: <http://www.infineon.com/dgdl/irfp4668pbf.pdf?fileId=5546d462533600a40153562c8528201d> (дата обращения: 05.07.2016).
11. Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments. URL: <http://www.ti.com/> (дата обращения: 20.03.2015).
12. TMS320F28335 controlCARD. URL: <http://www.ti.com/tool/tmdscncd28335?keyMatch=TMS320F28335&tisearch=Search-EN-Everything> (дата обращения: 05.07.2016).
13. TMS320F28335 Digital Signal Controller. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/sprs439m/sprs439m.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).
14. TMS320F28335 Experimenter Kit. URL: <http://www.ti.com/tool/tmdsdock28335?keyMatch=TMS320F28335&tisearch=Search-EN-Everything> (дата обращения: 05.07.2016).
15. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Module. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug04a/sprug04a.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).
16. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module. URL: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug05a/sprug05a.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).
17. ISO/IEC 9899:2011 – Information technology – Programming languages – C. URL:

http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=57853 (дата обращения: 07.02.2016).

18. Current Transducer LTS 25-NP. URL: <http://www.lem.com/docs/products/lts%2025-np.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).

19. MathWorks - MATLAB and Simulink for Technical Computing. URL: <http://www.mathworks.com/> (дата обращения: 08.09.2015).

20. Block Masks – MATLAB & Simulink. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/block-masks.html> (дата обращения: 07.02.2016).

21. Entry point to C/C++ or Fortran MEX-file – MATLAB. URL: <http://www.mathworks.com/help/matlab/apiref/mexfunction.html> (дата обращения: 07.02.2016).

22. Simulink – Simulation and Model-Based Design. URL: <http://www.mathworks.com/products/simulink/> (дата обращения: 07.02.2016).

23. Simulink Engine Interaction with C S-Functions – MATLAB & Simulink. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/how-the-simulink-engine-interacts-with-c-s-functions.html> (дата обращения: 07.02.2016).

24. What Is an S-Function? – MATLAB & Simulink. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/what-is-an-s-function.html> (дата обращения: 07.02.2016).

25. CreateThread function (Windows). URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms682453%28v=vs.85%29.aspx> (дата обращения: 07.02.2016).

26. Multiple Threads (Windows). URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms684254%28v=vs.85%29.aspx> (дата обращения: 07.02.2016).

27. What is a DLL? URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/kb/815065/> (дата обращения: 07.02.2016).

28. Цифровой запоминающий осциллограф TDS2000C | Tektronix. URL: <http://ru.tek.com/oscilloscope/tds2000-digital-storage-oscilloscope> (дата обращения: 05.07.2016).
29. Айчифер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е изд. М. : Издательский дом «Вильямс», 2004.
30. Аристов А. В. Разработка и исследование прецизионного электропривода угловых синусоидальных колебаний : автореф. дис... канд. техн. наук. Томск, 1982.
31. 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.
32. Аристов А. В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. Томск : Издательско-полиграфическая фирма ГПУ, 2000.
33. Аристов А. В. Электропривод колебательного движения в режиме прерывистого перемещения // Изв. Том. политехн. ун-та, 2008. Т. 313, № 4. Энергетика. С. 107–109.
34. Аристов А. В., Нагорный В. О. Управление двухфазным асинхронным двигателем в оптико-механических системах со сканированием // Докл. Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2013. № 2 (28) С. 60–63.
35. 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.
36. 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.
37. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. М. : Энергия, 1974.

38. Бурулько Л. К. Специальные электроприводы переменного тока: учебное пособие. Томск : Изд-во ТПУ, 2007.
39. Бушнев Д. В. Исследование асинхронного электропривода периодического движения с варьируемыми законами управления : автореф. дис... канд. техн. наук. Воронеж, 2000.
40. Пат. 2148293 Российская Федерация. Электропривод периодического движения. / Бушнев Д. В., Катугин С. Н., Кононенко Е. В., Ткалич С. А., Черных Д. В. МПК H02P7/62, H02P7/00 ; заявл. 16.11.1998 ; опубл. 27.04.2000.
41. Бушнев Д. В., Романов А. В. Теоретические основы циф-ровой обработки сигналов: Учеб. пособие. Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005.
42. Вернов Н. И. Разработка и исследование колебательных электродвигателей для вибрационно-фазовых измерительных устройств : автореф. дис... канд. техн. наук. Свердловск, 1980.
43. Дробилка вибрационная роликовая МВР-0,3. URL: <http://www.vibrocom.ru/device/mills/mvr/mvr03.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
44. Запитуемая установка. URL: <http://www.vibrocom.ru/solution/feed/feed1.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
45. Измельчитель пластинчатый (ИП). URL: <http://www.vibrocom.ru/device/grinders/ip/ip.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
46. Конвейер вибрационный КВ1Т-0,15. URL: http://www.vibrocom.ru/device/feeders/conveyer/conveyer_kv1t_015.htm (дата обращения: 17.06.2016).
47. Мельница вибрационная МВ-0,2. URL: <http://www.vibrocom.ru/device/mills/mv/mv02.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
48. ООО «Вибротехцентр» - Портал вибрационного оборудования. URL: <http://www.vibrocom.ru/> (дата обращения: 17.06.2016).

49. Питатель вибрационный ПВ-0,15. URL: <http://www.vibrocom.ru/device/feeders/feeder/pv015.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
50. Питатель вибрационный с активатором ПВА-0,45. URL: <http://www.vibrocom.ru/device/feeders/activator/pva045.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
51. Просеиватель СВП1-0,8/1.2-П. URL: http://www.vibrocom.ru/device/sieve/prv/prv1_08_12_p.htm (дата обращения: 17.06.2016).
52. Сита, просеиватели. URL: <http://www.vibrocom.ru/device/sieve/sieve.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
53. Смеситель вибрационный СМВ-0,4. URL: <http://www.vibrocom.ru/device/mixers/smv/smv04.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
54. Столы вибрационные (ВС и ВСЛ). URL: <http://www.vibrocom.ru/device/tables/vs/vs.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
55. Установка по измельчению и рассеву материалов УИР-1,0. URL: <http://www.vibrocom.ru/solution/crush-sieve/crush-sieve1.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
56. Установка по многокомпонентному смешиванию сыпучих материалов УМКС-1,0. URL: <http://www.vibrocom.ru/solution/mix/mix1.htm> (дата обращения: 17.06.2016).
57. Воронина Н. А. Асинхронный электропривод с прерывистым законом движения : дис... канд. техн. наук. Томск, 2013.
58. Воронов А. А., Ким Д. П., Лохин В. М. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». / под ред. А. А. Воронова. 2-е изд. М. : Высш. шк., 1986.
59. Гаврилов Ю. А. Обоснование режимов работы вибрационной щековой дробилки с авторезонансным электроприводом маятниковых

вибровозбудителей возвратно-вращательного движения : автореф. дис... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2010.

60. Гончаревич И. Ф., Фролов К. В. Теория вибрационной техники и технологии. М. : Наука, 1998.

61. Пат. 2089988 Российская Федерация. Электропривод. / Горелик Э. А., Жуковский Ю. В., Литвинов Б. В., Тув А. М., Хомяков В. В. МПК Н 02 К 7/00 ; заявл. 7.03.1995 ; опубл. 10.09.1997.

62. Грачев С. А. Исследование динамики специальных режимов работы асинхронных электродвигателей : автореф. дис... канд. техн. наук. Томск, 1975.

63. Грачев С. А., Луковников В. И. Безредукторный электромашинный привод периодического движения. Минск : Высш. шк., 1991.

64. Громов А. К., Ершов А. Г., Лихачева А. В. Электромеханическое преобразование энергии : учебное пособие. Иваново, 2008., 2008. 1 электрон. опт. диск (CD-RW).

65. Данилов С. Н., Иванов А. В., Москвитин С. П. Самолетный метеонавигационный радиолокатор: методические указания. Тамбов : ТГТУ, 2012.

66. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В. Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов. 5-е изд. Санкт-Петербург : Питер, 2009.

67. Дьяконов В. П. Simulink 4. Специальный справочник. Санкт-Петербург : Питер, 2001.

68. Евстигнеев Л. Ф. Маломощный асинхронный электродвигатель, управляемый подмагничиванием током переменной частоты : автореф. дис... канд. техн. наук. Горький, 1969.

69. Зиновьев Г. Г. Координатная точность однокоординатного сканирования : автореф. дис... канд. техн. наук. 1981.

70. Ивоботенко Б. А., Казаченко В. Ф. Проектирование шагового электропривода. М. : Изд-во Моск. энерг. ин-та, 1985.

71. ЛИР-158 – инкрементный угловой фотоэлектрический преобразователь перемещений. URL: <http://www.skbis.ru/index.php?c=4&d=10&p=3> (дата обращения: 05.07.2016).
72. Казанцев Ю. М. Динамика управляемых преобразовательных устройств. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011.
73. Казанцев Ю. М., Лекарев А. Ф. Формирование управления по балансу необходимой и накопленной в системе энергии // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2009. № 5 С. 17–20.
74. Керниган Б., Ритчи Д. Язык программирования Си. 2-е изд. М. : Вильямс, 2007.
75. Копылов И. П. Электромеханические преобразователи энергии. М. : Энергия, 1974.
76. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. М. : Высшая шк., 1987.
77. Копылов И. П., Горяинов Ф. А., Клоков Б. А. Проектирование электрических машин. / под ред. И. П. Копылова. М. : Энергия, 1980.
78. Копылов И. П., Траоре А., Амбарцумова Т. Т. Расчёт энергетических показателей асинхронных двигателей при автоматизированном проектировании // Электротехника, 1985. № 7 С. 32–34.
79. Корнеева Н. Н. Особенности вибрационного перемешивания многокомпонентных сред // Вестник астраханского гос. техн. ун-та, 2006. № 2 (31) С. 31-35.
80. Кудараускас С. Ю. Синхронные двигатели колебательного движения : автореф. дис... д-ра. техн. наук. М., 1980.
81. Кухлинг Х. Справочник по физике. М. : Мир, 1982.
82. Лазарева Т. Я., Мартемьянов Ю. Ф. Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.
83. Лекарев А. Ф., Нагорный В. О., Аристов А. В. Управление импульсным преобразователем напряжения по балансу необходимой и накопленной в

системе энергии // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VI междунар. науч.-техн. конф. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. С. 192–196.

84. Линенко А. В. Разработка бункера-питателя для процессов хранения и переработки продуктов на базе линейного асинхронного электропривода : автореф. дис... канд. техн. наук. Челябинск, 2004.

85. Разработка и исследование линейного колебательного электропривода с асимметричным законом движения : Отчёт о НИР (промежуточный) / ТПИ; Рук: А. В. Лоос. № ГР0186.0132096; инв. 0288.0035991. Томск, 1987.

86. Разработка и исследование линейного колебательного электропривода с асимметричным законом движения : Отчёт о НИР (промежуточный) / ТПИ; Рук: А. В. Лоос. № ГР0186.0132096; инв. 0287.0030359. Томск, 1987.

87. Луковников В. И. Основы общей теории электродвигателей вращательного и поступательного движения, работающих в режиме колебаний : автореф. дис... канд. техн. наук. Свердловск, 1979.

88. Луковников В. И. Электромашинный безредукторный колебательный электропривод // Электротехническая промышленность. Электропривод, 1980. № 8 (88) С. 14–18.

89. Луковников В. И. Электропривод колебательного движения. М. : Энергоатомиздат, 1984.

90. 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.

91. Любарский Б. Г., Рябов Е. С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MATLAB Simulink // MATLAB : материалы V междунар. науч. конф. / сост. В. В. Замаруев. Харьков : БЭТ, 2011. С. 404–424.

92. Маевский О. А. Энергетические характеристики вентильных преобразователей. М. : Энергия, 1978.

93. Малофиенко С. Г. Разработка и исследование колебательных электроприводов с периодическим движением вала (штока) : автореф. дис... канд. техн. наук. Томск, 1982.
94. Нагорный В. О., Аристов А. В., Гаврилов А. М. Использование математической модели импульсного преобразователя напряжения для отработки алгоритмов управления // Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII междунар. науч.-техн. конф. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. С. 201-206.
95. Нагорный В. О., Аристов А. В. Асинхронный электропривод антенны радиолокатора секторного обзора в режиме пульсирующего движения // Вестник СибГАУ, 2015. Т. 16, № 1 С. 97–103.
96. Нигматулин Р. И. Вибрационные процессы в двухфазных средах и их влияние на теплообмен : автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1994.
97. Новикова Ю. А. Создание и исследование мехатронного модуля имплантируемой системы вспомогательного кровообращения : автореф. дис... канд. техн. наук. Владимир, 2003.
98. Овинова С. А. Разработка установок сельскохозяйственного назначения с асинхронным приводом колебательного перемещения : автореф. дис... канд. техн. наук. М., 2005.
99. Понтрягин Л. С. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М. : Гос. изд во физ мат. литературы, 1961.
100. Савенкова А. Е. Методика расчёта и моделирование процесса диссипации энергии в механических пеносмесителях пожарных автомобилей : дис... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2014.
101. Садовский Б. Д. Асинхронный двигатель как машина возвратно-поступательного движения // Вестник электропромышленности, 1940. № 7 С. 8–10.
102. Пат. 2122699 Российская Федерация. Оптико-лазерная система для прицеливания и дальнометрирования целей. / Симонов М. П., Кнышев А. И.,

- Троельников Ю. В., Сопин В. П., Турок Р. С., Трейнер И. Л., Абрамов В. А. МПК F41G3/22 ; заявл. 17.06.1998 ; опубл. 27.11.1998.
103. Со Л. А. Исследование и разработка автоматических устройств управления замкнутыми шаговыми электроприводами с внутришаговой дискретной коррекцией скорости : автореф. дис... канд. техн. наук. М., 2008.
104. Соколов М. М., Сорокин Л. К. Электропривод с линейными асинхронными двигателями. М. : Энергия, 1974.
105. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные и волновые транспортирующие машины. М. : Наука, 1991.
106. Оптико-локационная станция ОЛС-35. URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/avionika/166-ols-35.html> (дата обращения: 17.06.2016).
107. Станция переднего обзора ОЛС-УЭ. URL: <http://www.npk-spp.ru/deyatelnost/avionika/127-ols-ue.html> (дата обращения: 17.06.2016).
108. Ткалич С. А. Разработка колебательного электропривода с повышенными энергетическими показателями : дис... канд. техн. наук. Томск, 1988.
109. Ткалич С. А., Аристов А. В., Шутов Е. А. К вопросу исследования энергетических процессов в колебательном электроприводе // Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей : тематический сборник научных трудов. Челябинский политехнический институт. Челябинск., 1987. С. 44–47.
110. Ту Ю. Современная теория управления. / под ред. В. В. Солодовникова. М. : Машиностроение, 1971.
111. Федотов В. М. Асинхронный колебательный электропривод с регулируемой собственной частотой : автореф. дис... канд. техн. наук. Томск, 1982.
112. Хромов Е. В. Линейный электропривод рабочих органов сельскохозяйственных машин с возвратно-поступательным движением : автореф. дис... канд. техн. наук. М., 2011.

113. Черных Д. В. Разработка и математическое моделирование замкнутых колебательных асинхронных электромеханических систем с частотным управлением : автореф. дис... канд. техн. наук. Воронеж, 2001.

114. Шишмарев В. Ю. Основы автоматического управления : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М. : Издательский центр «Академия», 2008.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчётные соотношения гармонических составляющих токов фаз АД при линейной фазовой модуляции питающих напряжений.

$$a_1 = \omega_1^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) - \omega_1^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - R_{\alpha s} R_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} R_r M_{\alpha}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2;$$

$$a_2 = -\omega_1^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2;$$

$$a_3 = -\omega_1^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_r L_{\alpha s} M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 - R_r L_{\beta s} M_{\alpha}^2) + \omega_1 (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s});$$

$$a_4 = \omega_1 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2);$$

$$a_{5k} = ((2k - 1)\Omega - \omega_1)^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) - ((2k - 1)\Omega - \omega_1)^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - R_{\alpha s} R_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} R_r M_{\alpha}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2;$$

$$a_{6k} = -((2k - 1)\Omega - \omega_1)^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2;$$

$$a_{7k} = -((2k - 1)\Omega - \omega_1)^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_r L_{\alpha s} M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 - R_r L_{\beta s} M_{\alpha}^2) + ((2k - 1)\Omega - \omega_1) (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s});$$

$$a_{8k} = ((2k - 1)\Omega - \omega_1) (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2);$$

$$a_{9k} = ((2k - 1)\Omega + \omega_1)^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) - ((2k - 1)\Omega + \omega_1)^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - R_{\alpha s} R_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} R_r M_{\alpha}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2;$$

$$a_{10k} = -((2k - 1)\Omega + \omega_1)^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2;$$

$$a_{11k} = -((2k - 1)\Omega + \omega_1)^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_r L_{\alpha s} M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 - R_r L_{\beta s} M_{\alpha}^2) +$$

$$\begin{aligned}
& +((2k-1)\Omega + \omega_1)(2R_{\alpha s}R_{\beta s}R_rL_r + R_{\alpha s}R_r^2L_{\beta s} + R_{\beta s}R_r^2L_{\alpha s}); \\
a_{12k} & = ((2k-1)\Omega + \omega_1)(R_{\alpha s}L_{\beta s}L_r^2 + R_{\beta s}L_{\alpha s}L_r^2 - R_{\alpha s}L_rM_{\beta}^2 - R_{\beta s}L_rM_{\alpha}^2); \\
a_{13} & = \omega_2^4(L_{\alpha s}L_{\beta s}L_r^2 - L_{\alpha s}L_rM_{\beta}^2 - L_{\beta s}L_rM_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2M_{\beta}^2) - \omega_2^2(R_{\alpha s}R_{\beta s}L_r^2 + \\
& + 2R_{\alpha s}R_rL_{\beta s}L_r + 2R_{\beta s}R_rL_{\alpha s}L_r + R_r^2L_{\alpha s}L_{\beta s} - R_{\alpha s}R_rM_{\beta}^2 - R_{\beta s}R_rM_{\alpha}^2) + \\
& + R_{\alpha s}R_{\beta s}R_r^2; \\
a_{14} & = -\omega_2^2(L_{\alpha s}L_{\beta s}L_r^2 - L_{\alpha s}L_rM_{\beta}^2 - L_{\beta s}L_rM_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2M_{\beta}^2) + R_{\alpha s}R_{\beta s}L_r^2; \\
a_{15} & = -\omega_2^3(R_{\alpha s}L_{\beta s}L_r^2 + R_{\beta s}L_{\alpha s}L_r^2 + 2R_rL_{\alpha s}L_{\beta s}L_r - R_{\alpha s}L_rM_{\beta}^2 - R_rL_{\alpha s}M_{\beta}^2 - \\
& - R_{\beta s}L_rM_{\alpha}^2 - R_rL_{\beta s}M_{\alpha}^2) + \omega_2(2R_{\alpha s}R_{\beta s}R_rL_r + R_{\alpha s}R_r^2L_{\beta s} + R_{\beta s}R_r^2L_{\alpha s}); \\
a_{16} & = \omega_2(R_{\alpha s}L_{\beta s}L_r^2 + R_{\beta s}L_{\alpha s}L_r^2 - R_{\alpha s}L_rM_{\beta}^2 - R_{\beta s}L_rM_{\alpha}^2); \\
b_1 & = -\omega_1^2(R_{\beta s}L_r^2 + 2R_rL_{\beta s}L_r - R_rM_{\beta}^2) + R_{\beta s}R_r^2; \\
b_2 & = R_{\beta s}L_r^2; \\
b_3 & = -\omega_1^3(L_{\beta s}L_r^2 - L_rM_{\beta}^2) + \omega_1(2R_{\beta s}R_rL_r + R_r^2L_{\beta s}); \\
b_4 & = \omega_1(L_{\beta s}L_r^2 - L_rM_{\beta}^2); \\
b_5 & = 0; \\
b_6 & = -\omega_1R_rM_{\alpha}M_{\beta}; \\
b_7 & = \omega_1^2(R_{\beta s}L_rM_{\alpha} + R_rL_{\beta s}M_{\alpha}); \\
b_8 & = -R_{\beta s}L_rM_{\alpha}; \\
b_9 & = -\omega_1^3(M_{\alpha}M_{\beta}^2 - L_{\beta s}L_rM_{\alpha}) - \omega_1R_{\beta s}R_rM_{\alpha}; \\
b_{10} & = -\omega_1(L_{\beta s}L_rM_{\alpha} - M_{\alpha}M_{\beta}^2); \\
b_{11} & = R_{\beta s}R_rM_{\alpha}; \\
b_{12} & = \omega_1R_rL_{\beta s}M_{\alpha}; \\
c_{1k} & = -((2k-1)\Omega - \omega_1)^2(R_{\beta s}L_r^2 + 2R_rL_{\beta s}L_r - R_rM_{\beta}^2) + R_{\beta s}R_r^2; \\
c_2 & = R_{\beta s}L_r^2; \\
c_{3k} & = -((2k-1)\Omega - \omega_1)^3(L_{\beta s}L_r^2 - L_rM_{\beta}^2) + ((2k-1)\Omega - \omega_1)(2R_{\beta s}R_rL_r + \\
& + R_r^2L_{\beta s}); \\
c_{4k} & = ((2k-1)\Omega - \omega_1)(L_{\beta s}L_r^2 - L_rM_{\beta}^2);
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_5 &= 0; \\
c_{6k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)R_r M_\alpha M_\beta; \\
c_{7k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1)^2 (R_{\beta s} L_r M_\alpha + R_r L_{\beta s} M_\alpha); \\
c_8 &= -R_{\beta s} L_r M_\alpha; \\
c_{9k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)^3 (M_\alpha M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha) - ((2k-1)\Omega - \omega_1)R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
c_{10k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)(L_{\beta s} L_r M_\alpha - M_\alpha M_\beta^2); \\
c_{11} &= R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
c_{12k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1)R_r L_{\beta s} M_\alpha; \\
d_{1k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^2 (R_{\beta s} L_r^2 + 2R_r L_{\beta s} L_r - R_r M_\beta^2) + R_{\beta s} R_r^2; \\
d_2 &= R_{\beta s} L_r^2; \\
d_{3k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^3 (L_{\beta s} L_r^2 - L_r M_\beta^2) + ((2k-1)\Omega + \omega_1)(2R_{\beta s} R_r L_r + \\
&\quad + R_r^2 L_{\beta s}); \\
d_{4k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1)(L_{\beta s} L_r^2 - L_r M_\beta^2); \\
d_5 &= 0; \\
d_{6k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)R_r M_\alpha M_\beta; \\
d_{7k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1)^2 (R_{\beta s} L_r M_\alpha + R_r L_{\beta s} M_\alpha); \\
d_8 &= -R_{\beta s} L_r M_\alpha; \\
d_{9k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^3 (M_\alpha M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha) - ((2k-1)\Omega + \omega_1)R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
d_{10k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)(L_{\beta s} L_r M_\alpha - M_\alpha M_\beta^2); \\
d_{11} &= R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
d_{12k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1)R_r L_{\beta s} M_\alpha; \\
e_1 &= 0; \\
e_2 &= \omega_2 R_r M_\alpha M_\beta; \\
e_3 &= -\omega_2^2 (R_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_r - R_r M_\alpha^2) + R_{\alpha s} R_r^2; \\
e_4 &= R_{\alpha s} L_r^2; \\
e_5 &= -\omega_2^3 (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2) + \omega_2 (2R_{\alpha s} R_r L_r + R_r^2 L_{\alpha s});
\end{aligned}$$

$$e_6 = \omega_2(L_{\alpha s}L_r^2 - L_rM_\alpha^2);$$

$$e_7 = -R_{\alpha s}R_rM_\beta;$$

$$e_8 = -\omega_2R_rL_{\alpha s}M_\beta;$$

$$e_9 = \omega_2^2(R_{\alpha s}L_rM_\beta + R_rL_{\alpha s}M_\beta);$$

$$e_{10} = -R_{\alpha s}L_rM_\beta;$$

$$e_{11} = -\omega_2^3(M_\alpha^2M_\beta - L_{\alpha s}L_rM_\beta) - \omega_2R_{\alpha s}R_rM_\beta;$$

$$e_{12} = -\omega_2(L_{\alpha s}L_rM_\beta - M_\alpha^2M_\beta).$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Расчётные соотношения гармонических составляющих токов фаз АД
при балансно-амплитудной модуляции питающих напряжений.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= (\omega_1 - \Omega)^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) - \\
 & - (\omega_1 - \Omega)^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - \\
 & - R_{\alpha s} R_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} R_r M_{\alpha}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2; \\
 a_2 &= -(\omega_1 - \Omega)^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2; \\
 a_3 &= -(\omega_1 - \Omega)^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - \\
 & - R_r L_{\alpha s} M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 - R_r L_{\beta s} M_{\alpha}^2) + (\omega_1 - \Omega) (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + \\
 & + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s}); \\
 a_4 &= (\omega_1 - \Omega) (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2); \\
 a_5 &= (\omega_1 + \Omega)^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) - \\
 & - (\omega_1 + \Omega)^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - \\
 & - R_{\alpha s} R_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} R_r M_{\alpha}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2; \\
 a_6 &= -(\omega_1 + \Omega)^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2; \\
 a_7 &= -(\omega_1 + \Omega)^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - \\
 & - R_r L_{\alpha s} M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 - R_r L_{\beta s} M_{\alpha}^2) + (\omega_1 + \Omega) (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + \\
 & + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s}); \\
 a_8 &= (\omega_1 + \Omega) (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2); \\
 a_9 &= \omega_1^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) - \\
 & - \omega_1^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - R_{\alpha s} R_r M_{\beta}^2 - \\
 & - R_{\beta s} R_r M_{\alpha}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2; \\
 a_{10} &= -\omega_1^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - L_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 + M_{\alpha}^2 M_{\beta}^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2; \\
 a_{11} &= -\omega_1^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - \\
 & - R_r L_{\alpha s} M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2 - R_r L_{\beta s} M_{\alpha}^2) + \omega_1 (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + \\
 & + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s}); \\
 a_{12} &= \omega_1 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_{\beta}^2 - R_{\beta s} L_r M_{\alpha}^2);
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_{13k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1)^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha^2 + M_\alpha^2 M_\beta^2) - \\
&- ((2k-1)\Omega - \omega_1)^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - \\
&- R_{\alpha s} R_r M_\beta^2 - R_{\beta s} R_r M_\alpha^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2; \\
a_{14k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha^2 + M_\alpha^2 M_\beta^2) + \\
&+ R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2; \\
a_{15k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - \\
&- R_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - R_r L_{\alpha s} M_\beta^2 - R_{\beta s} L_r M_\alpha^2 - R_r L_{\beta s} M_\alpha^2) + \\
&+ ((2k-1)\Omega - \omega_1) (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s}); \\
a_{16k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1) (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - R_{\beta s} L_r M_\alpha^2); \\
a_{17k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1)^4 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha^2 + M_\alpha^2 M_\beta^2) - \\
&- ((2k-1)\Omega + \omega_1)^2 (R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2 + 2R_{\alpha s} R_r L_{\beta s} L_r + 2R_{\beta s} R_r L_{\alpha s} L_r + R_r^2 L_{\alpha s} L_{\beta s} - \\
&- R_{\alpha s} R_r M_\beta^2 - R_{\beta s} R_r M_\alpha^2) + R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r^2; \\
a_{18k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^2 (L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 - L_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha^2 + M_\alpha^2 M_\beta^2) + \\
&+ R_{\alpha s} R_{\beta s} L_r^2; \\
a_{19k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^3 (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_{\beta s} L_r - \\
&- R_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - R_r L_{\alpha s} M_\beta^2 - R_{\beta s} L_r M_\alpha^2 - R_r L_{\beta s} M_\alpha^2) + \\
&+ ((2k-1)\Omega + \omega_1) (2R_{\alpha s} R_{\beta s} R_r L_r + R_{\alpha s} R_r^2 L_{\beta s} + R_{\beta s} R_r^2 L_{\alpha s}); \\
a_{20k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1) (R_{\alpha s} L_{\beta s} L_r^2 + R_{\beta s} L_{\alpha s} L_r^2 - R_{\alpha s} L_r M_\beta^2 - R_{\beta s} L_r M_\alpha^2); \\
b_1 &= -(\omega_1 - \Omega)^2 (R_{\beta s} L_r^2 + 2R_r L_{\beta s} L_r - R_r M_\beta^2) + R_{\beta s} R_r^2; \\
b_2 &= R_{\beta s} L_r^2; \\
b_3 &= -(\omega_1 - \Omega)^3 (L_{\beta s} L_r^2 - L_r M_\beta^2) + (\omega_1 - \Omega) (2R_{\beta s} R_r L_r + R_r^2 L_{\beta s}); \\
b_4 &= (\omega_1 - \Omega) (L_{\beta s} L_r^2 - L_r M_\beta^2); \\
b_5 &= 0; \\
b_6 &= -(\omega_1 - \Omega) R_r M_\alpha M_\beta; \\
b_7 &= (\omega_1 - \Omega)^2 (R_{\beta s} L_r M_\alpha + R_r L_{\beta s} M_\alpha);
\end{aligned}$$

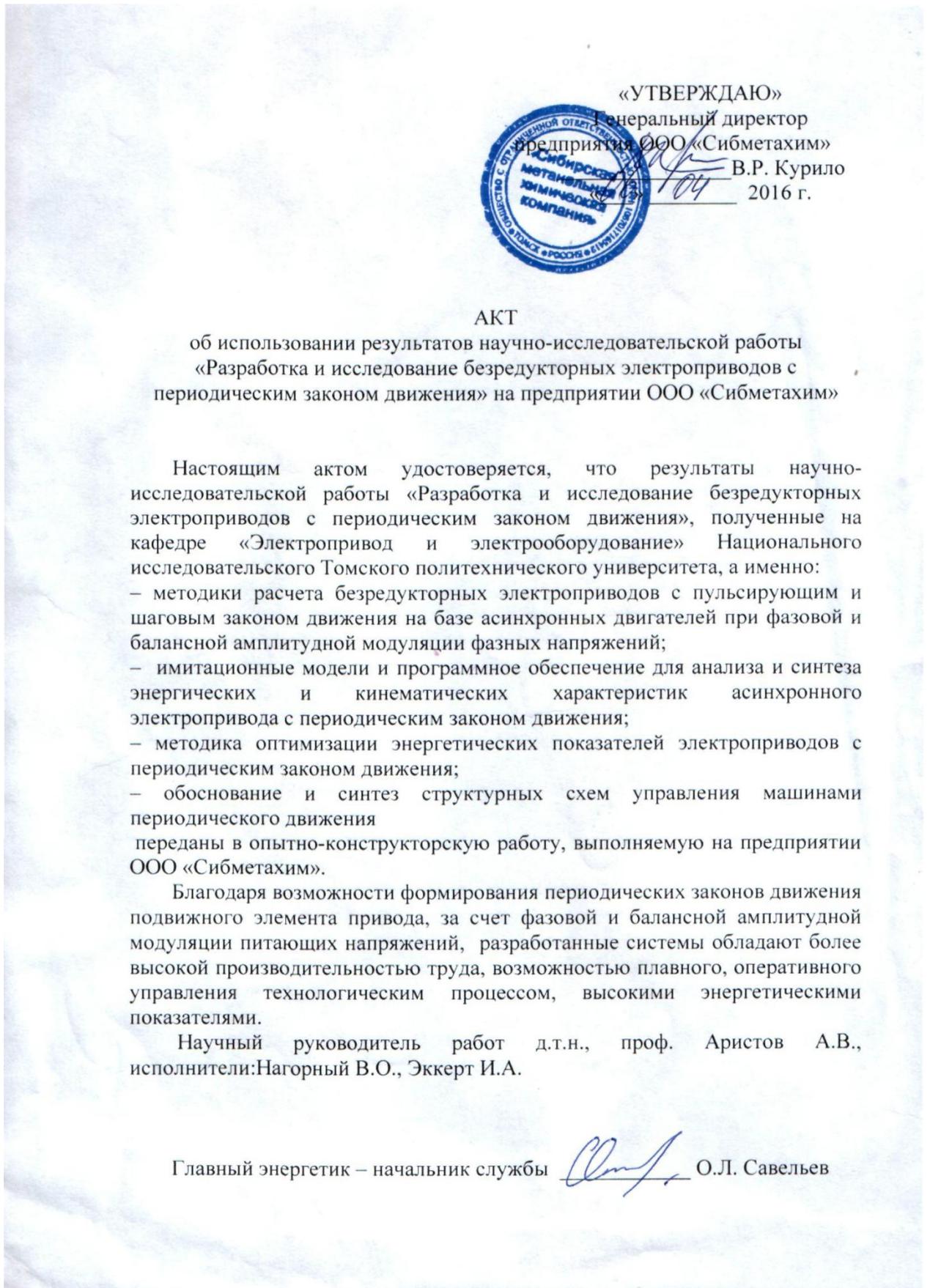
$$\begin{aligned}
b_8 &= -R_{\beta s} L_r M_\alpha; \\
b_9 &= -(\omega_1 - \Omega)^3 (M_\alpha M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha) - (\omega_1 - \Omega) R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
b_{10} &= -(\omega_1 - \Omega) (L_{\beta s} L_r M_\alpha - M_\alpha M_\beta^2); \\
b_{11} &= R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
b_{12} &= (\omega_1 - \Omega) R_r L_{\beta s} M_\alpha; \\
c_1 &= -(\omega_1 + \Omega)^2 (R_{\beta s} L_r^2 + 2R_r L_{\beta s} L_r - R_r M_\beta^2) + R_{\beta s} R_r^2; \\
c_2 &= R_{\beta s} L_r^2; \\
c_3 &= -(\omega_1 + \Omega)^3 (L_{\beta s} L_r^2 - L_r M_\beta^2) + (\omega_1 + \Omega) (2R_{\beta s} R_r L_r + R_r^2 L_{\beta s}); \\
c_4 &= (\omega_1 + \Omega) (L_{\beta s} L_r^2 - L_r M_\beta^2); \\
c_5 &= 0; \\
c_6 &= -(\omega_1 + \Omega) R_r M_\alpha M_\beta; \\
c_7 &= (\omega_1 + \Omega)^2 (R_{\beta s} L_r M_\alpha + R_r L_{\beta s} M_\alpha); \\
c_8 &= -R_{\beta s} L_r M_\alpha; \\
c_9 &= -(\omega_1 + \Omega)^3 (M_\alpha M_\beta^2 - L_{\beta s} L_r M_\alpha) - (\omega_1 + \Omega) R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
c_{10} &= -(\omega_1 + \Omega) (L_{\beta s} L_r M_\alpha - M_\alpha M_\beta^2); \\
c_{11} &= R_{\beta s} R_r M_\alpha; \\
c_{12} &= (\omega_1 + \Omega) R_r L_{\beta s} M_\alpha; \\
d_1 &= 0; \\
d_2 &= \omega_1 R_r M_\alpha M_\beta; \\
d_3 &= -\omega_1^2 (R_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_r - R_r M_\alpha^2) + R_{\alpha s} R_r^2; \\
d_4 &= R_{\alpha s} L_r^2; \\
d_5 &= -\omega_1^3 (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2) + \omega_1 (2R_{\alpha s} R_r L_r + R_r^2 L_{\alpha s}); \\
d_6 &= \omega_1 (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2); \\
d_7 &= -R_{\alpha s} R_r M_\beta; \\
d_8 &= -\omega_1 R_r L_{\alpha s} M_\beta; \\
d_9 &= \omega_1^2 (R_{\alpha s} L_r M_\beta + R_r L_{\alpha s} M_\beta); \\
d_{10} &= -R_{\alpha s} L_r M_\beta;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
d_{11} &= -\omega_1^3(M_\alpha^2 M_\beta - L_{\alpha s} L_r M_\beta) - \omega_1 R_{\alpha s} R_r M_\beta; \\
d_{12} &= -\omega_1(L_{\alpha s} L_r M_\beta - M_\alpha^2 M_\beta); \\
e_1 &= 0; \\
e_{2k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1) R_r M_\alpha M_\beta; \\
e_{3k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)^2 (R_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_r - R_r M_\alpha^2) + R_{\alpha s} R_r^2; \\
e_4 &= R_{\alpha s} L_r^2; \\
e_{5k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)^3 (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2) + \\
&+ ((2k-1)\Omega - \omega_1) (2R_{\alpha s} R_r L_r + R_r^2 L_{\alpha s}); \\
e_{6k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1) (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2); \\
e_7 &= -R_{\alpha s} R_r M_\beta; \\
e_{8k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1) R_r L_{\alpha s} M_\beta; \\
e_{9k} &= ((2k-1)\Omega - \omega_1)^2 (R_{\alpha s} L_r M_\beta + R_r L_{\alpha s} M_\beta); \\
e_{10} &= -R_{\alpha s} L_r M_\beta; \\
e_{11k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1)^3 (M_\alpha^2 M_\beta - L_{\alpha s} L_r M_\beta) - ((2k-1)\Omega - \omega_1) R_{\alpha s} R_r M_\beta; \\
e_{12k} &= -((2k-1)\Omega - \omega_1) (L_{\alpha s} L_r M_\beta - M_\alpha^2 M_\beta); \\
f_1 &= 0; \\
f_{2k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1) R_r M_\alpha M_\beta; \\
f_{3k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^2 (R_{\alpha s} L_r^2 + 2R_r L_{\alpha s} L_r - R_r M_\alpha^2) + R_{\alpha s} R_r^2; \\
f_4 &= R_{\alpha s} L_r^2; \\
f_{5k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1)^3 (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2) + \\
&+ ((2k-1)\Omega + \omega_1) (2R_{\alpha s} R_r L_r + R_r^2 L_{\alpha s}); \\
f_{6k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1) (L_{\alpha s} L_r^2 - L_r M_\alpha^2); \\
f_7 &= -R_{\alpha s} R_r M_\beta; \\
f_{8k} &= -((2k-1)\Omega + \omega_1) R_r L_{\alpha s} M_\beta; \\
f_{9k} &= ((2k-1)\Omega + \omega_1)^2 (R_{\alpha s} L_r M_\beta + R_r L_{\alpha s} M_\beta); \\
f_{10} &= -R_{\alpha s} L_r M_\beta;
\end{aligned}$$

$$f_{11k} = -((2k-1)\Omega + \omega_1)^3 (M_\alpha^2 M_\beta - L_{\alpha s} L_r M_\beta) - ((2k-1)\Omega + \omega_1) R_{\alpha s} R_r M_\beta;$$

$$f_{12k} = -((2k-1)\Omega + \omega_1) (L_{\alpha s} L_r M_\beta - M_\alpha^2 M_\beta).$$

Акты внедрения





«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
АО «НПЦ «Полос»
С. А. Русановский

« 05 » 10 2016 г.

АКТ

об использовании результатов научно-исследовательской работы
«Разработка и исследование преобразователя напряжения с управлением по
балансу необходимой и накопленной энергии»

Настоящим актом удостоверяется, что результаты научно-исследовательской работы «Разработка и исследование преобразователя напряжения с управлением по балансу необходимой и накопленной энергии», полученные в АО «НПЦ «Полос», а именно:

- алгоритмы управления импульсными преобразователями по балансу необходимой и накопленной энергии;

- программное обеспечение, реализующее алгоритмы управления по балансу необходимой и накопленной энергии;

- схемное решение цифровой системы управления;
используется в макетном образце, разрабатываемого в АО «НПЦ «Полос» унифицированного высоковольтного модуля питания, создаваемого в рамках НИР «Энергетика-Полос», заказчик Госкорпорация «Роскосмос».

Благодаря применению алгоритмов управления по балансу необходимой и накопленной в системе энергии, разработанный преобразователь с цифровой системой управления имеет лучшие переходные характеристики по сравнению с аналоговой системой управления.

Научный руководитель к. т. н. Гордеев К. Г., исполнители
Нагорный В. О., Гаврилов А. М.

Главный конструктор И. В. Балюс И. В. Балюс



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ЭНИИ, д. т. н.
В. М. Завьялов

« 10 » 10 2016 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Нагорного В. О. в учебном процессе ТПУ

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы Нагорного В. О. «Асинхронный электропривод пульсирующего движения», а именно:

- методики расчёта безредукторных электроприводов с пульсирующим законом движения на базе асинхронных двигателей при фазовой и амплитудной модуляции питающих напряжений;

- имитационные модели и программное обеспечение для анализа и синтеза энергетических и кинематических характеристик асинхронного электропривода с периодическим законом движения;

- методика оптимизации энергетических показателей электроприводов с периодическим законом движения;

- алгоритмы управления импульсными преобразователями по балансу необходимой и накопленной энергии;

- программное обеспечение, реализующее алгоритмы управления по балансу необходимой и накопленной энергии

используются в учебном процессе кафедры «Электропривод и электрооборудование» ТПУ при подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 и магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Представленные методики расчёта, имитационные модели, алгоритмы и программное обеспечение позволяют синтезировать электроприводы периодического движения с заданными свойствами и исследовать их выходные и энергетические характеристики.

Научный руководитель д. т. н. Аристов А. В., исполнитель Нагорный В. О.

Зав. кафедры ЭПЭО ТПУ

Ю. Н. Дементьев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 130157

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫМ
АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В РЕЖИМЕ
ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2013103568

Приоритет полезной модели 25 января 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 июля 2013 г.

Срок действия патента истекает 25 января 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов.



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 133990

УСТРОЙСТВО ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В РЕЖИМЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013125274

Приоритет полезной модели 30 мая 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 октября 2013 г.

Срок действия патента истекает 30 мая 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Программа среды MATLAB для расчёта параметров пульсирующего движения при линейной фазовой модуляции питающих напряжений

```
clear();

%
% Исходные данные
%

%
% Параметры питания
%

U = 230;% В
f = 50;% Гц
f1 = 52;% Гц
f2 = f;% Гц
gamma = 0;% град
Omega = 0.4 * pi;% рад/с

%
% Параметры машины
%

R1 = 9.195;% Ом
R2 = 8.564;% Ом
X1 = 10.218;% Ом
X2 = 13.143;% Ом
Xm = 149.035;% Ом
kd = 1;

%
% Параметры нагрузки привода
%

Imex = 0.002;
Rmex = 0.2;
Cmex = 0;
M = 0;

%
% Параметры моделирования
%

StartTime = 0;% Время начала, с
StopTime = 1;% Время окончания, с
Step = 0.001;% Размер шага, с
nWaves = 100;% Число гармоник

%
% Пересчёт
%

gamma = pi * gamma / 180;
Steps = round((StopTime - StartTime) / Step);% Количество шагов

Um = sqrt(2) * U;
```

```

Um1 = Um;
Um2 = Um;

w = 2 * pi * f;
w1 = 2 * pi * f1;
w2 = 2 * pi * f2;

L1 = (X1 + Xm) / w;
L2 = (X2 + Xm) / w;
Lm = Xm / w;

%
% Значения для расчёта
%

Ras = R1;
Rbs = R1;
Rr = R2;
Las = L1;
Lbs = L1;
Lr = L2;
Ma = Lm;
Mb = Lm;

%
% Расчёт
%

if (w1 ~= 0) || (w2 ~= 0) % Частота пульсаций
    Omega = w1 - w2;
end

w = Omega;

%
% Корни
%

S = zeros(4, nWaves);

S(1, 1) = w1;

for k = 1:nWaves
    S(2, k) = (2 * k - 1) * Omega - w1;
    S(3, k) = (2 * k - 1) * Omega + w1;
end

S(4, 1) = w2;

%
% Функции расчёта коэффициентов
%

af1 = @(x) (x ^ 4) * (Las * Lbs * Lr ^ 2 - Las * Lr * Mb ^ 2 - Lbs * Lr * Ma
^ 2 + Ma ^ 2 * Mb ^ 2) - ...
(x ^ 2) * (Ras * Rbs * Lr ^ 2 + 2 * Ras * Rr * Lbs * Lr + 2 * Rbs * Rr *
Las * Lr + Rr ^ 2 * Las * Lbs - ...
Ras * Rr * Mb ^ 2 - Rbs * Rr * Ma ^ 2) + Ras * Rbs * Rr ^ 2;

af2 = @(x) -(x ^ 2) * (Las * Lbs * Lr ^ 2 - Las * Lr * Mb ^ 2 - Lbs * Lr * Ma
^ 2 + Ma ^ 2 * Mb ^ 2) + Ras * Rbs * Lr ^ 2;

```

```

af3 = @(x) -(x ^ 3) * (Ras * Lbs * Lr ^ 2 + Rbs * Las * Lr ^ 2 + 2 * Rr * Las
* Lbs * Lr - Ras * Lr * Mb ^ 2 - Rr * Las * Mb ^ 2 - ...
Rbs * Lr * Ma ^ 2 - Rr * Lbs * Ma ^ 2) + x * (2 * Ras * Rbs * Rr * Lr +
Ras * Rr ^ 2 * Lbs + Rbs * Rr ^ 2 * Las);

af4 = @(x) x * (Ras * Lbs * Lr ^ 2 + Rbs * Las * Lr ^ 2 - Ras * Lr * Mb ^ 2 -
Rbs * Lr * Ma ^ 2);

r1 = @(x) -(x ^ 2) * (Rbs * Lr ^ 2 + 2 * Rr * Lbs * Lr - Rr * Mb ^ 2) + Rbs *
Rr ^ 2;
r2 = @(x) Rbs * Lr ^ 2;
r3 = @(x) -(x ^ 3) * (Lbs * Lr ^ 2 - Lr * Mb ^ 2) + x * (2 * Rbs * Rr * Lr +
Rr ^ 2 * Lbs);
r4 = @(x) x * (Lbs * Lr ^ 2 - Lr * Mb ^ 2);
r5 = @(x) 0;
r6 = @(x) -x * Rr * Ma * Mb;
r7 = @(x) (x ^ 2) * (Rbs * Lr * Ma + Rr * Lbs * Ma);
r8 = @(x) -Rbs * Lr * Ma;
r9 = @(x) -(x ^ 3) * (Ma * Mb ^ 2 - Lbs * Lr * Ma) - x * Rbs * Rr * Ma;
r10 = @(x) -x * (Lbs * Lr * Ma - Ma * Mb ^ 2);
r11 = @(x) Rbs * Rr * Ma;
r12 = @(x) x * Rr * Lbs * Ma;

r13 = @(x) 0;
r14 = @(x) x * Rr * Ma * Mb;
r15 = @(x) -(x ^ 2) * (Ras * Lr ^ 2 + 2 * Rr * Las * Lr - Rr * Ma ^ 2) + Ras
* Rr ^ 2;
r16 = @(x) Ras * Lr ^ 2;
r17 = @(x) -(x ^ 3) * (Las * Lr ^ 2 - Lr * Ma ^ 2) + x * (2 * Ras * Rr * Lr +
Rr ^ 2 * Las);
r18 = @(x) x * (Las * Lr ^ 2 - Lr * Ma ^ 2);
r19 = @(x) -Ras * Rr * Mb;
r20 = @(x) -x * Rr * Las * Mb;
r21 = @(x) (x ^ 2) * (Ras * Lr * Mb + Rr * Las * Mb);
r22 = @(x) -Ras * Lr * Mb;
r23 = @(x) -(x ^ 3) * (Ma ^ 2 * Mb - Las * Lr * Mb) - x * Ras * Rr * Mb;
r24 = @(x) -x * (Las * Lr * Mb - Ma ^ 2 * Mb);

R0 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;

R1 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R2 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R3 = @(x) x;
R4 = @(x) x * w;
R5 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R6 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R7 = @(x) x * w;
R8 = @(x) x * w;

R9 = @(x) x;
R10 = @(x) x * w;
R11 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R12 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R13 = @(x) x * w;
R14 = @(x) x * w;
R15 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R16 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;

% a, b, c, d, e

a = zeros(16, nWaves);

```

```

a(1, 1) = af1(S(1, 1));
a(2, 1) = af2(S(1, 1));
a(3, 1) = af3(S(1, 1));
a(4, 1) = af4(S(1, 1));

for k = 1:nWaves
    a(5, k) = af1(S(2, k));
    a(6, k) = af2(S(2, k));
    a(7, k) = af3(S(2, k));
    a(8, k) = af4(S(2, k));
    a(9, k) = af1(S(3, k));
    a(10, k) = af2(S(3, k));
    a(11, k) = af3(S(3, k));
    a(12, k) = af4(S(3, k));
end

a(13, 1) = af1(S(4, 1));
a(14, 1) = af2(S(4, 1));
a(15, 1) = af3(S(4, 1));
a(16, 1) = af4(S(4, 1));

b = zeros(12, 1);

b(1) = r1(S(1, 1));
b(2) = r2(S(1, 1));
b(3) = r3(S(1, 1));
b(4) = r4(S(1, 1));
b(5) = r5(S(1, 1));
b(6) = r6(S(1, 1));
b(7) = r7(S(1, 1));
b(8) = r8(S(1, 1));
b(9) = r9(S(1, 1));
b(10) = r10(S(1, 1));
b(11) = r11(S(1, 1));
b(12) = r12(S(1, 1));

c = zeros(12, nWaves);

for k = 1:nWaves
    c(1, k) = r1(S(2, k));
end

c(2, 1) = r2(S(2, 1));

for k = 1:nWaves
    c(3, k) = r3(S(2, k));
    c(4, k) = r4(S(2, k));
end

c(5, 1) = r5(S(2, 1));

for k = 1:nWaves
    c(6, k) = r6(S(2, k));
    c(7, k) = r7(S(2, k));
end

c(8, 1) = r8(S(2, 1));

for k = 1:nWaves
    c(9, k) = r9(S(2, k));

```

```

        c(10, k) = r10(S(2, k));
end

c(11, 1) = r11(S(2, 1));

for k = 1:nWaves
    c(12, k) = r12(S(2, k));
end

d = zeros(12, nWaves);

for k = 1:nWaves
    d(1, k) = r1(S(3, k));
end

d(2, 1) = r2(S(3, 1));

for k = 1:nWaves
    d(3, k) = r3(S(3, k));
    d(4, k) = r4(S(3, k));
end

d(5, 1) = r5(S(3, 1));

for k = 1:nWaves
    d(6, k) = r6(S(3, k));
    d(7, k) = r7(S(3, k));
end

d(8, 1) = r8(S(3, 1));

for k = 1:nWaves
    d(9, k) = r9(S(3, k));
    d(10, k) = r10(S(3, k));
end

d(11, 1) = r11(S(3, k));

for k = 1:nWaves
    d(12, k) = r12(S(3, k));
end

e = zeros(12, 1);

e(1) = r13(S(4, 1));
e(2) = r14(S(4, 1));
e(3) = r15(S(4, 1));
e(4) = r16(S(4, 1));
e(5) = r17(S(4, 1));
e(6) = r18(S(4, 1));
e(7) = r19(S(4, 1));
e(8) = r20(S(4, 1));
e(9) = r21(S(4, 1));
e(10) = r22(S(4, 1));
e(11) = r23(S(4, 1));
e(12) = r24(S(4, 1));

% A, B, C, D, E

A = zeros(8, nWaves);

```

```

A(1, 1) = R0(a(1, 1), a(2, 1));
A(2, 1) = R0(a(3, 1), a(4, 1));

for k = 1:nWaves
    A(3, k) = R0(a(5, k), a(6, k));
    A(4, k) = R0(a(7, k), a(8, k));
    A(5, k) = R0(a(9, k), a(10, k));
    A(6, k) = R0(a(11, k), a(12, k));
end

A(7, 1) = R0(a(13, 1), a(14, 1));
A(8, 1) = R0(a(15, 1), a(16, 1));

B = zeros(8, 1);

B(1) = R1(b(1), b(2));
B(2) = R2(b(3), b(4));
B(3) = R3(b(5));
B(4) = R4(b(6));
B(5) = R5(b(7), b(8));
B(6) = R6(b(9), b(10));
B(7) = R7(b(11));
B(8) = R8(b(12));

C = zeros(8, nWaves);

for k = 1:nWaves
    C(1, k) = R1(c(1, k), c(2, 1));
    C(2, k) = R2(c(3, k), c(4, k));
end

C(3, 1) = R3(c(5, 1));

for k = 1:nWaves
    C(4, k) = R4(c(6, k));
    C(5, k) = R5(c(7, k), c(8, 1));
    C(6, k) = R6(c(9, k), c(10, k));
end

C(7, 1) = R7(c(11, 1));

for k = 1:nWaves
    C(8, k) = R8(c(12, k));
end

D = zeros(8, nWaves);

for k = 1:nWaves
    D(1, k) = R1(d(1, k), d(2, 1));
    D(2, k) = R2(d(3, k), d(4, k));
end

D(3, 1) = R3(d(5, 1));

for k = 1:nWaves
    D(4, k) = R4(d(6, k));
    D(5, k) = R5(d(7, k), d(8, 1));
    D(6, k) = R6(d(9, k), d(10, k));
end

```

```

D(7, 1) = R7(d(11, 1));

for k = 1:nWaves
    D(8, k) = R8(d(12, k));
end

E = zeros(8, 1);

E(1) = R9(e(1));
E(2) = R10(e(2));
E(3) = R11(e(3), e(4));
E(4) = R12(e(5), e(6));
E(5) = R13(e(7));
E(6) = R14(e(8));
E(7) = R15(e(9), e(10));
E(8) = R16(e(11), e(12));

T = zeros(4, 4, nWaves);
delta = zeros(4, 4, nWaves);

%
% T1n
%

for k = 1:4
    T(1, k, 1) = sqrt(((A(1, 1) * B(2 * k - 1, 1) + A(2, 1) * B(2 * k, 1)) ^
2) + ...
    ((A(2, 1) * B(2 * k - 1, 1) - A(1, 1) * B(2 * k, 1)) ^ 2)) / (2 *
(A(1, 1) ^ 2 + A(2, 1) ^ 2));

    delta(1, k, 1) = arg(A(1, 1) * B(2 * k - 1, 1) + A(2, 1) * B(2 * k, 1),
A(2, 1) * B(2 * k - 1, 1) - A(1, 1) * B(2 * k, 1));

    if isnan(delta(1, k, 1))
        delta(1, k, 1) = 0;
    end
end

%
% T2nk
%

for k = 1:4
    for l = 1:nWaves
        T(2, k, l) = sqrt(((A(3, 1) * C(2 * k, l) - A(4, 1) * C(2 * k - 1,
1)) ^ 2) + ...
        ((A(3, 1) * C(2 * k - 1, l) + A(4, 1) * C(2 * k, l)) ^ 2)) / ((2
* l - 1) * (A(3, 1) ^ 2 + A(4, 1) ^ 2));

        delta(2, k, l) = arg(A(3, 1) * C(2 * k, l) - A(4, 1) * C(2 * k - 1,
1), A(3, 1) * C(2 * k - 1, l) + A(4, 1) * C(2 * k, l));

        if isnan(delta(2, k, l))
            delta(2, k, l) = 0;
        end
    end
end

%
% T3nk
%
```

```

for k = 1:4
    for l = 1:nWaves
        T(3, k, l) = sqrt(((A(5, l) * D(2 * k, l) - A(6, l) * D(2 * k - 1,
1)) ^ 2) + ...
            ((A(5, l) * D(2 * k - 1, l) + A(6, l) * D(2 * k, l)) ^ 2)) / ((2
* l - 1) * (A(5, l) ^ 2 + A(6, l) ^ 2));

        delta(3, k, l) = arg(A(5, l) * D(2 * k, l) - A(6, l) * D(2 * k - 1,
1), A(5, l) * D(2 * k - 1, l) + A(6, l) * D(2 * k, l));

        if isnan(delta(3, k, l))
            delta(3, k, l) = 0;
        end
    end
end

%
% T4n
%

for k = 1:4
    T(4, k, l) = sqrt(((A(7, l) * E(2 * k, l) - A(8, l) * E(2 * k - 1, l)) ^
2) + ...
        ((A(7, l) * E(2 * k - 1, l) + A(8, l) * E(2 * k, l)) ^ 2)) / (A(7, l)
^ 2 + A(8, l) ^ 2);

    delta(4, k, l) = arg(A(7, l) * E(2 * k, l) - A(8, l) * E(2 * k - 1, l),
A(7, l) * E(2 * k - 1, l) + A(8, l) * E(2 * k, l));

    if isnan(delta(4, k, l))
        delta(4, k, l) = 0;
    end
end

%
% Освобождаем память
%

clear('A', 'B', 'C', 'D', 'E');

%
% Для расчёта энергетических характеристик
%

TempT = T;
TempDelta = delta;

t = zeros(1, Steps);

for k = 1:Steps
    t(k) = (Step * (k - 1)) + StartTime;
end

ias = zeros(1, Steps);
ibs = zeros(1, Steps);
iar = zeros(1, Steps);
ibr = zeros(1, Steps);

for k = 1:4% Перебираем токи
    for l = 1:Steps% Шаги

```

```

        y = Um1 * T(1, k, 1) * sin(w1 * t(1) + delta(1, k, 1)) + Um2 * T(4,
k, 1) * sin(w2 * t(1) + gamma + delta(4, k, 1));

        for m = 1:nWaves% Гармоники
            y = y + (Um1 / pi) * T(2, k, m) * sin(((2 * m - 1) * Omega - w1)
* t(1) + delta(2, k, m));
            y = y + (Um1 / pi) * T(3, k, m) * sin(((2 * m - 1) * Omega + w1)
* t(1) + delta(3, k, m));
        end

        switch k
            case 1
                ias(1) = y;

            case 2
                ibs(1) = y;

            case 3
                iar(1) = y;

            case 4
                ibr(1) = y;
        end
    end
end

%figure();
plot(t, ias, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('ias(t)');

%figure();
plot(t, ibs, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('ibs(t)');

%figure();
plot(t, iar, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('iar(t)');

%figure();
plot(t, ibr, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('ibr(t)');

Mem = kd .* (Ma .* ias .* ibr - Mb .* ibs .* iar);

%figure();
plot(t, Mem, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('Mem(t)');

% [X, Y, Z] = SolveDisp(Lmex, Rmex, Cmex, Mem, Step, 0, 0);
%
% %figure();
% plot(t, X, 'LineWidth', 2);
% grid();
%
% %figure();
% plot(t, Y, 'LineWidth', 2);

```

```

% grid();
%
% figure();
% plot(t, Z, 'LineWidth', 2);
% grid();

% ss = Steps;
%
% fs = zeros(1, ss);
% Y = zeros(ss, 1);
%
% fss = 1 / (Step * Steps);
%
% for k = 0:ss - 1
%     fs(k + 1) = k * fss;
% end
%
% X = CurrentSpectrum(ias, ibs, iar, ibr, ss);
%
% figure();
% bar(fs, X);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 1);
% end
%
% figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 2);
% end
%
% figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 3);
% end
%
% figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 4);
% end
%
% figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% clear('X', 'Y', 'Z');

%
% Перемещение
%
%

```

```

% Четырёхмерные массивы (индексы):
% 1.1. 1 - частота вращения 0.
% 1.2. 2 - производная от тока, частота вращения 0.
% 2. Номер компонента тока.
% 3. Номер тока.
% 3.1. ias.
% 3.2. ibs.
% 3.3. iar.
% 3.4. ibr.
% 4. Гармоники.
%

T = zeros(2, 4, 4, nWaves);
delta = zeros(2, 4, 4, nWaves);

T(1, 1, 1, 1) = (1 / 2) * sqrt((b(1) ^ 2 + b(3) ^ 2) / (a(1, 1) ^ 2 + a(3, 1)
^ 2));
delta(1, 1, 1, 1) = arg(a(1, 1) * b(1) + a(3, 1) * b(3), a(3, 1) * b(1) -
a(1, 1) * b(3));

if isnan(delta(1, 1, 1, 1))
    delta(1, 1, 1, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    T(1, 2, 1, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((c(1, k) ^ 2 + c(3, k) ^ 2) /
(a(5, k) ^ 2 + a(7, k) ^ 2));
    delta(1, 2, 1, k) = arg(a(5, k) * c(3, k) - a(7, k) * c(1, k), a(5, k) *
c(1, k) + a(7, k) * c(3, k));

    if isnan(delta(1, 2, 1, k))
        delta(1, 2, 1, k) = 0;
    end

    T(1, 3, 1, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((d(1, k) ^ 2 + d(3, k) ^ 2) /
(a(9, k) ^ 2 + a(11, k) ^ 2));
    delta(1, 3, 1, k) = arg(a(9, k) * d(3, k) - a(11, k) * d(1, k), a(9, k) *
d(1, k) + a(11, k) * d(3, k));

    if isnan(delta(1, 3, 1, k))
        delta(1, 3, 1, k) = 0;
    end
end

T(1, 4, 1, 1) = 0;
delta(1, 4, 1, 1) = 0;
T(1, 1, 2, 1) = 0;
delta(1, 1, 2, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(1, 2, 2, k) = 0;
    delta(1, 2, 2, k) = 0;
    T(1, 3, 2, k) = 0;
    delta(1, 3, 2, k) = 0;
end

T(1, 4, 2, 1) = sqrt((e(3) ^ 2 + e(5) ^ 2) / (a(13) ^ 2 + a(15) ^ 2));
delta(1, 4, 2, 1) = arg(a(13, 1) * e(5) - a(15, 1) * e(3), a(13, 1) * e(3) +
a(15, 1) * e(5));

if isnan(delta(1, 4, 2, 1))
    delta(1, 4, 2, 1) = 0;
end

```

```

end

T(1, 1, 3, 1) = (1 / 2) * sqrt((b(7) ^ 2 + b(9) ^ 2) / (a(1, 1) ^ 2 + a(3, 1)
^ 2));
delta(1, 1, 3, 1) = arg(a(1, 1) * b(7) + a(3, 1) * b(9), a(3, 1) * b(7) -
a(1, 1) * b(9));

if isnan(delta(1, 1, 3, 1))
    delta(1, 1, 3, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    T(1, 2, 3, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((c(7, k) ^ 2 + c(9, k) ^ 2) /
(a(5, k) ^ 2 + a(7, k) ^ 2));
    delta(1, 2, 3, k) = arg(a(5, k) * c(9, k) - a(7, k) * c(7, k), a(5, k) *
c(7, k) + a(7, k) * c(9, k));

    if isnan(delta(1, 2, 3, k))
        delta(1, 2, 3, k) = 0;
    end

    T(1, 3, 3, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((d(7, k) ^ 2 + d(9, k) ^ 2) /
(a(9, k) ^ 2 + a(11, k) ^ 2));
    delta(1, 3, 3, k) = arg(a(9, k) * d(9, k) - a(11, k) * d(7, k), a(9, k) *
d(7, k) + a(11, k) * d(9, k));

    if isnan(delta(1, 3, 3, k))
        delta(1, 3, 3, k) = 0;
    end
end

end

T(1, 4, 3, 1) = 0;
delta(1, 4, 3, 1) = 0;
T(1, 1, 4, 1) = 0;
delta(1, 1, 4, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(1, 2, 4, k) = 0;
    delta(1, 2, 4, k) = 0;
    T(1, 3, 4, k) = 0;
    delta(1, 3, 4, k) = 0;
end

T(1, 4, 4, 1) = sqrt((e(9) ^ 2 + e(11) ^ 2) / (a(13) ^ 2 + a(15) ^ 2));
delta(1, 4, 4, 1) = arg(a(13, 1) * e(11) - a(15, 1) * e(9), a(13, 1) * e(9) +
a(15, 1) * e(11));

if isnan(delta(1, 4, 4, 1))
    delta(1, 4, 4, 1) = 0;
end

end

T(2, 1, 1, 1) = 0;
delta(2, 1, 1, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(2, 2, 1, k) = 0;
    delta(2, 2, 1, k) = 0;
    T(2, 3, 1, k) = 0;
    delta(2, 3, 1, k) = 0;
end

end

```

```

T(2, 4, 1, 1) = (e(2) * sqrt(a(13, 1) ^ 2 + a(15, 1) ^ 2)) / (a(13, 1) ^ 2 +
a(15, 1) ^ 2);
delta(2, 4, 1, 1) = arg(a(13, 1), a(15, 1));

if isnan(delta(2, 4, 1, 1))
    delta(2, 4, 1, 1) = 0;
end

T(2, 1, 2, 1) = (b(6) * sqrt(a(1, 1) ^ 2 + a(3, 1) ^ 2)) / (2 * (a(1, 1) ^ 2
+ a(3, 1) ^ 2));
delta(2, 1, 2, 1) = arg(a(3, 1), -a(1, 1));

if isnan(delta(2, 1, 2, 1))
    delta(2, 1, 2, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    T(2, 2, 2, k) = (c(6, k) * sqrt(a(5, k) ^ 2 + a(7, k) ^ 2)) / ((2 * k -
1) * (a(5, k) ^ 2 + a(7, k) ^ 2));
    delta(2, 2, 2, k) = arg(a(5, k), a(7, k));

    if isnan(delta(2, 2, 2, k))
        delta(2, 2, 2, k) = 0;
    end

    T(2, 3, 2, k) = (d(6, k) * sqrt(a(9, k) ^ 2 + a(11, k) ^ 2)) / ((2 * k -
1) * (a(9, k) ^ 2 + a(11, k) ^ 2));
    delta(2, 3, 2, k) = arg(a(9, k), a(11, k));

    if isnan(delta(2, 3, 2, k))
        delta(2, 3, 2, k) = 0;
    end
end

T(2, 4, 2, 1) = 0;
delta(2, 4, 2, 1) = 0;
T(2, 1, 3, 1) = 0;
delta(2, 1, 3, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(2, 2, 3, k) = 0;
    delta(2, 2, 3, k) = 0;
    T(2, 3, 3, k) = 0;
    delta(2, 3, 3, k) = 0;
end

T(2, 4, 3, 1) = sqrt((e(7) ^ 2 + e(8) ^ 2) / (a(13, 1) ^ 2 + a(15, 1) ^ 2));
delta(2, 4, 3, 1) = arg(a(13, 1) * e(8) - a(15, 1) * e(7), a(13, 1) * e(7) +
a(15, 1) * e(8));

if isnan(delta(2, 4, 3, 1))
    delta(2, 4, 3, 1) = 0;
end

T(2, 1, 4, 1) = (1 / 2) * sqrt((b(11) ^ 2 + b(12) ^ 2) / (a(1, 1) ^ 2 + a(3,
1) ^ 2));
delta(2, 1, 4, 1) = arg(a(1, 1) * b(11) + a(3, 1) * b(12), a(3, 1) * b(11) -
a(1, 1) * b(12));

if isnan(delta(2, 1, 4, 1))
    delta(2, 1, 4, 1) = 0;
end

```

```

end

for k = 1:nWaves
    T(2, 2, 4, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((c(11, 1) ^ 2 + c(12, k) ^ 2) /
(a(5, k) ^ 2 + a(7, k) ^ 2));
    delta(2, 2, 4, k) = arg(a(5, k) * c(12, k) - a(7, k) * c(11, 1), a(5, k)
* c(11, 1) + a(7, k) * c(12, k));

    if isnan(delta(2, 2, 4, k))
        delta(2, 2, 4, k) = 0;
    end

    T(2, 3, 4, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((d(11, 1) ^ 2 + d(12, k) ^ 2) /
(a(9, k) ^ 2 + a(11, k) ^ 2));
    delta(2, 3, 4, k) = arg(a(9, k) * d(12, k) - a(11, k) * d(11, 1), a(9, k)
* d(11, 1) + a(11, k) * d(12, k));

    if isnan(delta(2, 3, 4, k))
        delta(2, 3, 4, k) = 0;
    end
end

T(2, 4, 4, 1) = 0;
delta(2, 4, 4, 1) = 0;

Ms = zeros(1, Steps);

if (w1 == 0) && (w2 == 0)

    %
    % Для постоянного тока
    %

    N = zeros(2, 6, nWaves);
    fi = zeros(2, 6, nWaves);

    N(1, 1, 1) = (kd * Ma * Um1 * Um2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1) / 2) *
sqrt(2 * (1 - cos(2 * (delta(1, 4, 4, 1) + gamma))));
    N(1, 2, 1) = (-kd * Mb * Um1 * Um2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1) / 2) *
sqrt(2 * (1 - cos(2 * delta(1, 1, 3, 1))));

    fi(1, 1, 1) = arg(sin(delta(1, 1, 1, 1) - delta(1, 4, 4, 1) - gamma) -
sin(delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 4, 4, 1) + gamma), ...
    cos(delta(1, 1, 1, 1) - delta(1, 4, 4, 1) - gamma) - cos(delta(1, 1,
1, 1) + delta(1, 4, 4, 1) + gamma)) + pi / 2;

    fi(1, 2, 1) = arg(sin(delta(1, 4, 2, 1) - delta(1, 1, 3, 1) + gamma) -
sin(delta(1, 4, 2, 1) + delta(1, 1, 3, 1) + gamma), ...
    cos(delta(1, 4, 2, 1) - delta(1, 1, 3, 1) + gamma) - cos(delta(1, 4,
2, 1) + delta(1, 1, 3, 1) + gamma)) + pi / 2;

    if isnan(fi(1, 1, 1))
        N(1, 1, 1) = 0;
        fi(1, 1, 1) = 0;
    end

    if isnan(fi(1, 2, 1))
        N(1, 2, 1) = 0;
        fi(1, 2, 1) = 0;
    end
end

```

```

    N_ = sqrt(N(1, 1, 1) ^ 2 + N(1, 2, 1) ^ 2 + 2 * N(1, 1, 1) * N(1, 2, 1) *
cos(fi(1, 2, 1) - fi(1, 1, 1)));
    fi_ = arg(N(1, 1, 1) * sin(fi(1, 1, 1)) + N(1, 2, 1) * sin(fi(1, 2, 1))),
...
    N(1, 1, 1) * cos(fi(1, 1, 1)) + N(1, 2, 1) * cos(fi(1, 2, 1)));

N(1, 1, 1) = N_;
fi(1, 1, 1) = fi_;

if isnan(fi(1, 1, 1))
    N(1, 1, 1) = 0;
    fi(1, 1, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    N(2, 1, k) = (kd * Ma * Um1 * Um2 * T(1, 2, 1, k) * T(1, 4, 4, 1) /
(2 * pi)) * sqrt(2 * (1 - cos(2 * (delta(1, 4, 4, 1) + gamma))));
    N(2, 2, k) = (-kd * Mb * Um1 * Um2 * T(1, 2, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) /
(2 * pi)) * sqrt(2 * (1 - cos(2 * (delta(1, 4, 2, 1) + gamma))));
    N(2, 3, k) = (kd * Ma * Um1 * Um2 * T(1, 3, 1, k) * T(1, 4, 4, 1) /
(2 * pi)) * sqrt(2 * (1 - cos(2 * (delta(1, 4, 4, 1) + gamma))));
    N(2, 4, k) = (-kd * Mb * Um1 * Um2 * T(1, 3, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) /
(2 * pi)) * sqrt(2 * (1 - cos(2 * (delta(1, 4, 2, 1) + gamma))));

    fi(2, 1, k) = arg(sin(delta(1, 2, 1, k) - delta(1, 4, 4, 1) - gamma)
- sin(delta(1, 2, 1, k) + delta(1, 4, 4, 1) + gamma), ...
    cos(delta(1, 2, 1, k) - delta(1, 4, 4, 1) - gamma) - cos(delta(1,
2, 1, k) + delta(1, 4, 4, 1) + gamma)) + pi / 2;

    fi(2, 2, k) = arg(sin(delta(1, 2, 3, k) - delta(1, 4, 2, 1) - gamma)
- sin(delta(1, 2, 3, k) + delta(1, 4, 2, 1) + gamma), ...
    cos(delta(1, 2, 3, k) - delta(1, 4, 2, 1) - gamma) - cos(delta(1,
2, 3, k) + delta(1, 4, 2, 1) + gamma)) + pi / 2;

    fi(2, 3, k) = arg(sin(delta(1, 3, 1, k) - delta(1, 4, 4, 1) - gamma)
- sin(delta(1, 3, 1, k) + delta(1, 4, 4, 1) + gamma), ...
    cos(delta(1, 3, 1, k) - delta(1, 4, 4, 1) - gamma) - cos(delta(1,
3, 1, k) + delta(1, 4, 4, 1) + gamma)) + pi / 2;

    fi(2, 4, k) = arg(sin(delta(1, 3, 3, k) - delta(1, 4, 2, 1) - gamma)
- sin(delta(1, 3, 3, k) + delta(1, 4, 2, 1) + gamma), ...
    cos(delta(1, 3, 3, k) - delta(1, 4, 2, 1) - gamma) - cos(delta(1,
3, 3, k) + delta(1, 4, 2, 1) + gamma)) + pi / 2;

    if isnan(fi(2, 1, k))
        N(2, 1, k) = 0;
        fi(2, 1, k) = 0;
    end

    if isnan(fi(2, 2, k))
        N(2, 2, k) = 0;
        fi(2, 2, k) = 0;
    end

    if isnan(fi(2, 3, k))
        N(2, 3, k) = 0;
        fi(2, 3, k) = 0;
    end

    if isnan(fi(2, 4, k))
        N(2, 4, k) = 0;
        fi(2, 4, k) = 0;
    end
end

```

```

end

N(2, 5, k) = sqrt(N(2, 1, k) ^ 2 + N(2, 2, k) ^ 2 + 2 * N(2, 1, k) *
N(2, 2, k) * cos(fi(2, 2, k) - fi(2, 1, k)));
N(2, 6, k) = sqrt(N(2, 3, k) ^ 2 + N(2, 4, k) ^ 2 + 2 * N(2, 3, k) *
N(2, 4, k) * cos(fi(2, 4, k) - fi(2, 3, k)));

fi(2, 5, k) = arg(N(2, 1, k) * sin(fi(2, 1, k)) + N(2, 2, k) *
sin(fi(2, 2, k)), ...
N(2, 1, k) * cos(fi(2, 1, k)) + N(2, 2, k) * cos(fi(2, 2, k)));

fi(2, 6, k) = arg(N(2, 3, k) * sin(fi(2, 3, k)) + N(2, 4, k) *
sin(fi(2, 4, k)), ...
N(2, 3, k) * cos(fi(2, 3, k)) + N(2, 4, k) * cos(fi(2, 4, k)));

if isnan(fi(2, 5, k))
    N(2, 5, k) = 0;
    fi(2, 5, k) = 0;
end

if isnan(fi(2, 6, k))
    N(2, 6, k) = 0;
    fi(2, 6, k) = 0;
end

N(2, 1, k) = sqrt(N(2, 5, k) ^ 2 + N(2, 6, k) ^ 2 + 2 * N(2, 5, k) *
N(2, 6, k) * cos(fi(2, 6, k) - fi(2, 5, k)));
fi(2, 1, k) = arg(N(2, 5, k) * sin(fi(2, 5, k)) + N(2, 6, k) *
sin(fi(2, 5, k)), ...
N(2, 5, k) * cos(fi(2, 5, k)) + N(2, 6, k) * cos(fi(2, 5, k)));

if isnan(fi(2, 1, k))
    N(2, 1, k) = 0;
    fi(2, 1, k) = 0;
end
end

%
% ПУСКОВОЙ МОМЕНТ
%

for k = 1:Steps
    Ms(k) = N(1, 1, 1) * sin(fi(1, 1, 1));

    for l = 1:nWaves
        Ms(k) = Ms(k) + N(2, 1, 1) * sin((2 * l - 1) * Omega * t(k) +
fi(2, 1, 1));
    end
end
else
    N = zeros(3, 2, nWaves);
    fi = zeros(3, nWaves);

    N(1, 1, 1) = (kd * Um1 * Um2 / 2) * sqrt(Ma ^ 2 * T(1, 1, 1, 1) ^ 2 *
T(1, 4, 4, 1) ^ 2 + ...
Mb ^ 2 * T(1, 1, 3, 1) ^ 2 * T(1, 4, 2, 1) ^ 2 - 2 * Ma * Mb * T(1,
1, 1, 1) * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1) * T(1, 4, 4, 1) * ...
cos(delta(1, 1, 1, 1) - delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 4, 2, 1) -
delta(1, 4, 4, 1)));

```

```

    fi(1, 1) = arg(-Ma * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1) * sin(gamma - delta(1,
1, 1, 1) + delta(1, 4, 4, 1)) + ...
    Mb * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1) * sin(gamma - delta(1, 1, 3, 1) +
delta(1, 4, 2, 1)), ...
    Ma * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1) * cos(gamma - delta(1, 1, 1, 1) +
delta(1, 4, 4, 1)) - ...
    Mb * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1) * cos(gamma - delta(1, 1, 3, 1) +
delta(1, 4, 2, 1))) + pi / 2;

    if isnan(fi(1, 1))
        fi(1, 1) = 0;
    end

    for k = 1:nWaves
        N(2, 1, k) = ((kd * Um1 * Um2) / (2 * pi)) * sqrt(Ma ^ 2 * T(1, 2, 1,
k) ^ 2 * T(1, 4, 4, 1) ^ 2 + ...
        Mb ^ 2 * T(1, 2, 3, k) ^ 2 * T(1, 4, 2, 1) ^ 2 - 2 * Ma * Mb *
T(1, 2, 1, k) * T(1, 2, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) * T(1, 4, 4, 1) * ...
        cos(delta(1, 2, 1, k) - delta(1, 2, 3, k) - delta(1, 4, 2, 1) +
delta(1, 4, 4, 1)));

        fi(2, k) = arg(-Ma * T(1, 2, 1, k) * T(1, 4, 4, 1) * sin(gamma +
delta(1, 2, 1, k) + delta(1, 4, 4, 1)) + ...
        Mb * T(1, 2, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) * sin(gamma + delta(1, 2, 3,
k) + delta(1, 4, 2, 1)), ...
        -Ma * T(1, 2, 1, k) * T(1, 4, 4, 1) * cos(gamma + delta(1, 2, 1,
k) + delta(1, 4, 4, 1)) + ...
        Mb * T(1, 2, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) * cos(gamma + delta(1, 2, 3,
k) + delta(1, 4, 2, 1))) + pi / 2;

        if isnan(fi(2, k))
            fi(2, k) = 0;
        end

        N(3, 1, k) = ((kd * Um1 * Um2) / (2 * pi)) * sqrt(Ma ^ 2 * T(1, 3, 1,
k) ^ 2 * T(1, 4, 4, 1) ^ 2 + ...
        Mb ^ 2 * T(1, 3, 3, k) ^ 2 * T(1, 4, 2, 1) ^ 2 - 2 * Ma * Mb *
T(1, 3, 1, k) * T(1, 3, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) * T(1, 4, 4, 1) * ...
        cos(delta(1, 3, 1, k) - delta(1, 3, 3, k) + delta(1, 4, 2, 1) -
delta(1, 4, 4, 1)));

        fi(3, k) = arg(-Ma * T(1, 3, 1, k) * T(1, 4, 4, 1) * sin(gamma -
delta(1, 3, 1, k) + delta(1, 4, 4, 1)) + ...
        Mb * T(1, 3, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) * sin(gamma - delta(1, 3, 3,
k) + delta(1, 4, 2, 1)), ...
        Ma * T(1, 3, 1, k) * T(1, 4, 4, 1) * cos(gamma - delta(1, 3, 1,
k) + delta(1, 4, 4, 1)) - ...
        Mb * T(1, 3, 3, k) * T(1, 4, 2, 1) * cos(gamma - delta(1, 3, 3,
k) + delta(1, 4, 2, 1))) + pi / 2;

        if isnan(fi(3, k))
            fi(3, k) = 0;
        end
    end

    %
    % ПуСКОВОЙ МОМЕНТ
    %

    for k = 1:Steps
        Ms(k) = N(1, 1, 1) * sin(Omega * t(k) + fi(1, 1));
    end

```

```

    for l = 1:nWaves
        Ms(k) = Ms(k) + N(2, 1, l) * sin((2 * l - 2) * Omega * t(k) +
fi(2, 1)) + N(3, 1, l) * sin(2 * l * Omega * t(k) + fi(3, 1));
    end
end

%
% Расчёт пускового момента без упрощений
%

%
%   for k = 1:Steps
%       Ms(k) = kd * (Ma * ((Um1 * Um2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1) / 2)
% * (cos(Omega * t(k) - gamma + delta(1, 1, 1, 1) - ...
%       delta(1, 4, 4, 1)) - cos((w1 + w2) * t(k) + gamma + delta(1, 1,
1, 1) + delta(1, 4, 4, 1)))) - ...
%       Mb * ((Um1 * Um2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1) / 2) *
(cos(Omega * t(k) - gamma + delta(1, 1, 3, 1) - delta(1, 4, 2, 1)) - ...
%       cos((w1 + w2) * t(k) + gamma + delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 4,
2, 1)))));
%
%       for l = 1:nWaves
%           Ms(k) = Ms(k) + (kd * Ma / pi) * ((Um1 * Um2 * T(1, 2, 1, 1) *
T(1, 4, 4, 1) / 2) * ...
%               (cos(((2 * l - 1) * Omega - w1 - w2) * t(k) - gamma +
delta(1, 2, 1, 1) - delta(1, 4, 4, 1)) - ...
%               cos((2 * l - 2) * Omega * t(k) + gamma + delta(1, 2, 1, 1)
+ delta(1, 4, 4, 1)))) + ...
%               (Um1 * Um2 * T(1, 3, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1) / 2) * ...
%               (cos(2 * l * Omega * t(k) - gamma + delta(1, 3, 1, 1) -
delta(1, 4, 4, 1)) - ...
%               cos(((2 * l - 1) * Omega + w1 + w2) * t(k) + gamma +
delta(1, 3, 1, 1) + delta(1, 4, 4, 1)))) - ...
%               (kd * Mb / pi) * ((Um1 * Um2 * T(1, 2, 3, 1) * T(1, 4, 2,
1) / 2) * ...
%               (cos((-2 * l - 1) * Omega + w1 + w2) * t(k) + gamma -
delta(1, 2, 3, 1) + delta(1, 4, 2, 1)) - ...
%               cos((2 * l - 2) * Omega * t(k) + gamma + delta(1, 2, 3, 1)
+ delta(1, 4, 2, 1)))) + ...
%               (Um1 * Um2 * T(1, 3, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1) / 2) * ...
%               (cos(2 * l * Omega * t(k) - gamma + delta(1, 3, 3, 1) -
delta(1, 4, 2, 1)) - ...
%               cos(((2 * l - 1) * Omega + w1 + w2) * t(k) + gamma +
delta(1, 3, 3, 1) + delta(1, 4, 2, 1)))));
%           end
%       end
end

%
% figure();
% plot(t, Ms, 'LineWidth', 2);
% grid();
% legend('Ms(t)');

%
% Демпфирующий момент
%

if (w1 == 0) && (w2 == 0)
    Md = 0;

%
% Существующий инструментарий не подходит для расчёта режима работы
% привода на постоянном токе. Нужны новые методики. Потому принимаем
% Md = 0.

```

```

%
else
    Md = kd * w * (Ma * ((Um2 ^ 2 * T(2, 4, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1) / 2) *
    cos(delta(2, 4, 1, 1) - delta(1, 4, 4, 1)) + ...
        (Um1 ^ 2 * T(1, 1, 1, 1) * T(2, 1, 4, 1) / 2) * cos(delta(1, 1, 1, 1)
    - delta(2, 1, 4, 1))) - ...
        Mb * ((Um1 ^ 2 * T(2, 1, 2, 1) * T(1, 1, 3, 1) / 2) * cos(delta(2, 1,
    2, 1) - delta(1, 1, 3, 1)) + ...
        (Um2 ^ 2 * T(1, 4, 2, 1) * T(2, 4, 3, 1) / 2) * cos(delta(1, 4, 2, 1)
    - delta(2, 4, 3, 1))));
end

Fd = Md / w;

if isnan(Fd)
    Fd = 0;
end

Tmp1 = N;
Tmp2 = fi;

if (w1 == 0) && (w2 == 0)

    %
    % Для постоянного тока
    %

    N(1, 2, 1) = N(1, 1, 1) * cos(fi(1, 1, 1));
    N(1, 1, 1) = N(1, 1, 1) * sin(fi(1, 1, 1));

    for k = 1:nWaves
        N(2, 2, k) = N(2, 1, k) * cos(fi(2, 1, k));
        N(2, 1, k) = N(2, 1, k) * sin(fi(2, 1, k));
    end

    XI = zeros(2, nWaves);
    alpha = zeros(2, nWaves);

    alpha(1, 1) = fi(1, 1, 1);

    for k = 1:nWaves
        XI1 = (N(2, 1, k) * (Cmex - Lmex * (2 * k - 1) ^ 2 * Omega ^ 2) -
        N(2, 2, k) * (Rmex - Fd) * (2 * k - 1) * Omega) / ...
            ((Cmex - Lmex * (2 * k - 1) ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^ 2 *
            (2 * k - 1) ^ 2 * Omega ^ 2);

        XI2 = (N(2, 2, k) * (Cmex - Lmex * (2 * k - 1) ^ 2 * Omega ^ 2) +
        N(2, 1, k) * (Rmex - Fd) * (2 * k - 1) * Omega) / ...
            ((Cmex - Lmex * (2 * k - 1) ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^ 2 *
            (2 * k - 1) ^ 2 * Omega ^ 2);

        XI(2, k) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
        alpha(2, k) = arg(XI1, XI2);

        if isnan(alpha(2, k))
            alpha(2, k) = 0;
        end
    end

    XI0 = zeros(1, Steps);

```

```

for k = 1:Steps% Шаги
    XI0(k) = XI(1, 1) * sin(alpha(1, 1));

    for l = 1:nWaves% Гармоники
        XI0(k) = XI0(k) + XI(2, l) * sin((2 * l - 1) * Omega * t(k) +
alpha(2, l));
    end
end
else
N(1, 2, 1) = N(1, 1, 1) * cos(fi(1, 1));
N(1, 1, 1) = N(1, 1, 1) * sin(fi(1, 1));

for k = 1:nWaves
    N(2, 2, k) = N(2, 1, k) * cos(fi(2, k));
    N(2, 1, k) = N(2, 1, k) * sin(fi(2, k));
    N(3, 2, k) = N(3, 1, k) * cos(fi(3, k));
    N(3, 1, k) = N(3, 1, k) * sin(fi(3, k));
end

%
% Внимание! Метод гармонического баланса применим только при расчёте
% периодических функций перемещения и не может быть применён при
% расчёте непериодических функций, например шаговой. Для расчёта
% непериодических функций перемещения рекомендуется использовать численные
% методы.
%

XI = zeros(3, nWaves);
alpha = zeros(3, nWaves);

XI1 = (N(1, 1, 1) * (Cmex - Lmex * Omega ^ 2) - N(1, 2, 1) * (Rmex - Fd)
* Omega) / ...
((Cmex - Lmex * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^ 2 * Omega ^ 2);

XI2 = (N(1, 2, 1) * (Cmex - Lmex * Omega ^ 2) + N(1, 1, 1) * (Rmex - Fd)
* Omega) / ...
((Cmex - Lmex * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^ 2 * Omega ^ 2);

XI(1, 1) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
alpha(1, 1) = arg(XI1, XI2);

if isnan(alpha(1, 1))
    alpha(1, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    if k ~= 1 || Cmex
        XI1 = (N(2, 1, k) * (Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) -
N(2, 2, k) * (Rmex - Fd) * (2 * k - 2) * Omega) / ...
((Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex -
Fd) ^ 2 * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2);

        XI2 = (N(2, 2, k) * (Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) +
N(2, 1, k) * (Rmex - Fd) * (2 * k - 2) * Omega) / ...
((Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex -
Fd) ^ 2 * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2);

        XI(2, k) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
        alpha(2, k) = arg(XI1, XI2);
    end
end

```

```

        if isnan(alpha(2, k))
            alpha(2, k) = 0;
        end
    else
        XI(2, k) = 0;
        alpha(2, k) = 0;
    end

    XI1 = (N(3, 1, k) * (Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) - 2 * N(3,
2, k) * (Rmex - Fd) * k * Omega) / ...
        ((Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + 4 * (Rmex - Fd) ^ 2
* k ^ 2 * Omega ^ 2);

    XI2 = (N(3, 2, k) * (Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) + 2 * N(3,
1, k) * (Rmex - Fd) * k * Omega) / ...
        ((Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + 4 * (Rmex - Fd) ^ 2
* k ^ 2 * Omega ^ 2);

    XI(3, k) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
    alpha(3, k) = arg(XI1, XI2);

    if isnan(alpha(3, k))
        alpha(3, k) = 0;
    end
end

XI0 = zeros(1, Steps);

for k = 1:Steps% Шары
    XI0(k) = XI(1, 1) * sin(Omega * t(k) + alpha(1, 1));

    for l = 1:nWaves% Гармоники
        XI0(k) = XI0(k) + XI(2, l) * sin((2 * l - 2) * Omega * t(k) +
alpha(2, l)) + XI(3, l) * sin(2 * l * Omega * t(k) + alpha(3, l));
    end
end

%
% Освобождаем память
%

clear('N', 'fi');
N = Tmp1;
fi = Tmp2;
clear('Tmp1', 'Tmp2');

%[E, w, XI0] = SolveDisp(Lmex, Rmex, Cmex, Ms, Step, 0, 0);

%figure();
plot(t, XI0 - XI0(1), 'LineWidth', 2);
grid();
legend('XI0(t)');

%
% Рассчёт энергетических характеристик
%

Mem = zeros(1, Steps);
w = zeros(1, Steps);

```

```

T = TempT;
delta = TempDelta;
clear('TempT', 'TempDelta');

Tx = 2 * pi / Omega;
Sx = Tx / Step;

if (w1 == 0) && (w2 == 0)

    %
    % Для постоянного тока
    %

    Uas = zeros(1, Steps);
    Ubs = zeros(1, Steps);

    for k = 1:Steps
        A = 0;

        if sin(Omega * t(k)) > 0
            A = 1;
        end

        Uas(k) = Um1 * A;
        Ubs(k) = Um2;
    end

    Pld = Uas .* ias + Ubs .* ibs;

    plot(t, Pld, 'LineWidth', 2);
    grid();
    legend('P1(t)');

    Plp = 0;

    for k = 1:Sx
        Plp = Plp + Pld(k) * Step;
    end

    Plp = Plp / Tx;
    P1 = 0;

    for k = 1:2
        switch k
            case 1
                tx = Tx;

            case 2
                tx = 0;
        end

        F1 = Um1 ^ 2 * T(1, 1, 1) * sin(delta(1, 1, 1)) * tx + Um1 * Um2 *
T(4, 1, 1) * sin(gamma + delta(4, 1, 1)) * tx;
        F2 = 0;

        for l = 1:nWaves
            F2 = F2 + ...
                T(2, 1, 1) * cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(2, 1, 1)) /
((2 * l - 1) * Omega) + ...
                T(3, 1, 1) * cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(3, 1, 1)) /
((2 * l - 1) * Omega);
        end
    end
end

```

```

end

F = F1 - (Um1 ^ 2 * F2) / pi;

switch k
    case 1
        P1 = P1 + F;

    case 2
        P1 = P1 - F;
end
end

for k = 1:2
    switch k
        case 1
            tx = Tx;

        case 2
            tx = 0;
    end

    F1 = Um1 * Um2 * T(1, 2, 1) * sin(delta(1, 2, 1)) * tx + Um2 ^ 2 *
T(4, 2, 1) * sin(gamma + delta(4, 2, 1)) * tx;
    F2 = 0;

    for l = 1:nWaves
        F2 = F2 + ...
            T(2, 2, 1) * cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(2, 2, 1)) /
((2 * l - 1) * Omega) + ...
            T(3, 2, 1) * cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(3, 2, 1)) /
((2 * l - 1) * Omega);
    end

    F = F1 - (Um1 * Um2 * F2) / pi;

    switch k
        case 1
            P1 = P1 + F;

        case 2
            P1 = P1 - F;
    end
end

P1 = P1 / Tx;

for k = 1:Steps
    Mem(k) = N(1, 1, 1) * sin(fi(1, 1, 1));

    for l = 1:nWaves
        Mem(k) = Mem(k) + N(2, 1, 1) * sin((2 * l - 1) * Omega * t(k) +
fi(2, 1, 1));
    end
end

wm = zeros(1, nWaves);
wm(1, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    wm(2, k) = XI(2, k) * (2 * k - 1) * Omega;
end

```

```

end

for k = 1:Steps
    w(k) = 0;

    for l = 1:nWaves
        w(k) = w(k) + wm(2, l) * cos((2 * l - 1) * Omega * t(k) +
alpha(2, l));
    end
end

S2d = Mem .* w;

plot(t, S2d, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('S2(t)');

S2p = 0;

for k = 1:Sx
    S2p = S2p + abs(S2d(k) * Step);
end

S2p = S2p / Tx;
P2 = 0;

for k = 1:nWaves
    P2 = P2 + (1 / 2) * N(2, 1, k) * wm(2, k) * sin(fi(2, 1, k) -
alpha(2, k));
end

Q2 = 0;

for k = 1:nWaves
    Q2 = Q2 - (1 / 2) * N(2, 1, k) * wm(2, k) * cos(fi(2, 1, k) -
alpha(2, k));
end
else
    Uas = zeros(1, Steps);
    Ubs = zeros(1, Steps);

    for k = 1:Steps
        A = 0;

        if sin(Omega * t(k)) > 0
            A = 1;
        end

        Uas(k) = Um1 * cos(w1 * t(k)) * A;
        Ubs(k) = Um2 * sin(w2 * t(k) + gamma);
    end
end

P1d = Uas .* ias + Ubs .* ibs;

plot(t, P1d, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('P1(t)');

P1p = 0;

```

```

for k = 1:Sx
    P1p = P1p + P1d(k) * Step;
end

P1p = P1p / Tx;
P1 = 0;

for k = 1:2
    switch k
        case 1
            tx = Tx / 2;

        case 2
            tx = 0;
    end

    F1 = (Um1 ^ 2 * T(1, 1, 1) / 2) * (sin(delta(1, 1, 1)) * tx - cos(2 *
w1 * tx + delta(1, 1, 1)) / (2 * w1)) + ...
        (Um1 * Um2 * T(1, 4, 1) / 2) * (cos(Omega * tx - gamma - delta(1,
4, 1)) / Omega + ...
        cos((w1 + w2) * tx + gamma + delta(1, 4, 1)) / (w1 + w2));

    F2 = 0;

    for l = 1:nWaves
        F2 = F2 + ...
            T(2, 1, 1) * (cos(((2 * l - 1) * Omega - 2 * w1) * tx +
delta(2, 1, 1)) / ((2 * l - 1) * Omega - 2 * w1) + ...
            cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(2, 1, 1)) / ((2 * l - 1)
* Omega)) + ...
            T(3, 1, 1) * (cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(3, 1, 1))
/ ((2 * l - 1) * Omega) + ...
            cos(((2 * l - 1) * Omega + 2 * w1) * tx + delta(3, 1, 1)) /
((2 * l - 1) * Omega + 2 * w1));
    end

    F = (F1 - (Um1 ^ 2 * F2) / (2 * pi));

    switch k
        case 1
            P1 = P1 + F;

        case 2
            P1 = P1 - F;
    end
end

for k = 1:2
    switch k
        case 1
            tx = Tx;

        case 2
            tx = 0;
    end

    F1 = (Um1 * Um2 * T(1, 2, 1) / 2) * (sin(Omega * tx - gamma +
delta(1, 2, 1)) / Omega - ...
        sin((w1 + w2) * tx + gamma + delta(1, 2, 1)) / (w1 + w2)) + ...
        (Um2 ^ 2 * T(4, 2, 1) / 2) * (cos(delta(4, 2, 1)) * tx - sin(2 *
w2 * tx + 2 * gamma + delta(4, 2, 1)) / (2 * w2));

```

```

F2 = 0;

for l = 1:nWaves
    if l ~= 1
        F2 = F2 + ...
            T(2, 2, l) * (sin(((2 * l - 1) * Omega - w1 - w2) * tx -
gamma + delta(2, 2, l)) - ...
            sin((2 * l - 2) * Omega * tx + gamma + delta(2, 2, l)) /
((2 * l - 2) * Omega)) + ...
            T(3, 2, l) * (sin(2 * l * Omega * tx - gamma + delta(3,
2, 1)) / (2 * l * Omega) - ...
            sin(((2 * l - 1) * Omega + w1 + w2) * tx + gamma +
delta(3, 2, 1)) / ((2 * l - 1) * Omega + w1 + w2));
    else
        F2 = F2 + ...
            T(2, 2, l) * sin(((2 * l - 1) * Omega - w1 - w2) * tx -
gamma + delta(2, 2, l)) + ...
            T(3, 2, l) * (sin(2 * l * Omega * tx - gamma + delta(3,
2, 1)) / (2 * l * Omega) - ...
            sin(((2 * l - 1) * Omega + w1 + w2) * tx + gamma +
delta(3, 2, 1)) / ((2 * l - 1) * Omega + w1 + w2));
    end
end

F = F1 + (Um1 * Um2 * F2) / (2 * pi);

switch k
    case 1
        P1 = P1 + F;

    case 2
        P1 = P1 - F;
end
end

P1 = P1 / Tx;

for k = 1:Steps
    Mem(k) = N(1, 1, 1) * sin(Omega * t(k) + fi(1, 1));

    for l = 1:nWaves
        Mem(k) = Mem(k) + N(2, 1, l) * sin((2 * l - 2) * Omega * t(k) +
fi(2, 1)) + N(3, 1, l) * sin(2 * l * Omega * t(k) + fi(3, 1));
    end
end

wm = zeros(1, nWaves);
wm(1, 1) = XI(1, 1) * Omega;

for k = 1:nWaves
    wm(2, k) = XI(2, k) * (2 * k - 2) * Omega;
    wm(3, k) = 2 * XI(3, k) * k * Omega;
end

for k = 1:Steps
    w(k) = wm(1, 1) * cos(Omega * t(k) + alpha(1, 1));

    for l = 1:nWaves
        w(k) = w(k) + wm(2, l) * cos((2 * l - 2) * Omega * t(k) +
alpha(2, 1)) + wm(3, l) * cos(2 * l * Omega * t(k) + alpha(3, 1));
    end
end

```

```

        end
    end

    S2d = Mem .* w;

    plot(t, S2d, 'LineWidth', 2);
    grid();
    legend('S2(t)');

    S2p = 0;

    for k = 1:Sx
        S2p = S2p + abs(S2d(k) * Step);
    end

    S2p = S2p / Tx;
    P2 = (1 / 2) * N(1, 1, 1) * wm(1, 1) * sin(fi(1, 1) - alpha(1, 1));

    for k = 1:nWaves - 1
        P2 = P2 + (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * sin(fi(2, k) - alpha(2,
k)) + N(3, 1, k) * wm(3, k) * sin(fi(3, k) - alpha(3, k)) + ...
        N(2, 1, k + 1) * wm(3, k) * sin(fi(2, k + 1) - alpha(3, k)) +
N(3, 1, k) * wm(2, k + 1) * sin(fi(3, k) - alpha(2, k + 1)));
    end

    k = nWaves;
    P2 = P2 + (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * sin(fi(2, k) - alpha(2, k))
+ N(3, 1, k) * wm(3, k) * sin(fi(3, k) - alpha(3, k)));

    Q2 = -(1 / 2) * N(1, 1, 1) * wm(1, 1) * cos(fi(1, 1) - alpha(1, 1));

    for k = 1:nWaves - 1
        Q2 = Q2 - (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * cos(fi(2, k) - alpha(2,
k)) + N(3, 1, k) * wm(3, k) * cos(fi(3, k) - alpha(3, k)) + ...
        N(2, 1, k + 1) * wm(3, k) * cos(fi(2, k + 1) - alpha(3, k)) +
N(3, 1, k) * wm(2, k + 1) * cos(fi(3, k) - alpha(2, k + 1)));
    end

    k = nWaves;
    Q2 = Q2 - (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * cos(fi(2, k) - alpha(2, k))
+ N(3, 1, k) * wm(3, k) * cos(fi(3, k) - alpha(3, k)));
end

S2 = sqrt(P2 ^ 2 + Q2 ^ 2);
eff = S2 / P1;

```

Программа среды MATLAB для расчёта параметров пульсирующего движения при амплитудной балансной модуляции питающих напряжений

```
clear();

%
% Исходные данные
%

%
% Параметры питания
%

U = 230;% В
f = 50;% Гц
f1 = f;% Гц
Omega = 4 * pi;% рад/с

%
% Параметры машины
%

R1 = 9.195;% Ом
R2 = 8.564;% Ом
X1 = 10.218;% Ом
X2 = 13.143;% Ом
Xm = 149.035;% Ом
kd = 1;

%
% Параметры нагрузки привода
%

Lmex = 0.002;
Rmex = 0.2;
Cmex = 0;
M = 0;

%
% Параметры моделирования
%

StartTime = 0;% Время начала, с
StopTime = 1;% Время окончания, с
Step = 0.001;% Размер шага, с
nWaves = 100;% Число гармоник

%
% Пересчёт
%

Steps = round((StopTime - StartTime) / Step);% Количество шагов

Um = sqrt(2) * U;
Um1 = Um;
Um2 = Um;

w = 2 * pi * f;
w1 = 2 * pi * f1;
```

```

L1 = (X1 + Xm) / w;
L2 = (X2 + Xm) / w;
Lm = Xm / w;

%
% Значения для расчёта
%

Ras = R1;
Rbs = R1;
Rr = R2;
Las = L1;
Lbs = L1;
Lr = L2;
Ma = Lm;
Mb = Lm;

%
% Расчёт
%

w = Omega;

%
% Корни
%

S = zeros(5, nWaves);

S(1, 1) = w1 - Omega;
S(2, 1) = w1 + Omega;
S(3, 1) = w1;

for k = 1:nWaves
    S(4, k) = (2 * k - 1) * Omega - w1;
    S(5, k) = (2 * k - 1) * Omega + w1;
end

%
% Функции расчёта коэффициентов
%

af1 = @(x) (x ^ 4) * (Las * Lbs * Lr ^ 2 - Las * Lr * Mb ^ 2 - Lbs * Lr * Ma
^ 2 + Ma ^ 2 * Mb ^ 2) - ...
(x ^ 2) * (Ras * Rbs * Lr ^ 2 + 2 * Ras * Rr * Lbs * Lr + 2 * Rbs * Rr *
Las * Lr + Rr ^ 2 * Las * Lbs - ...
Ras * Rr * Mb ^ 2 - Rbs * Rr * Ma ^ 2) + Ras * Rbs * Rr ^ 2;

af2 = @(x) -(x ^ 2) * (Las * Lbs * Lr ^ 2 - Las * Lr * Mb ^ 2 - Lbs * Lr * Ma
^ 2 + Ma ^ 2 * Mb ^ 2) + Ras * Rbs * Lr ^ 2;

af3 = @(x) -(x ^ 3) * (Ras * Lbs * Lr ^ 2 + Rbs * Las * Lr ^ 2 + 2 * Rr * Las
* Lbs * Lr - Ras * Lr * Mb ^ 2 - Rr * Las * Mb ^ 2 - ...
Rbs * Lr * Ma ^ 2 - Rr * Lbs * Ma ^ 2) + x * (2 * Ras * Rbs * Rr * Lr +
Ras * Rr ^ 2 * Lbs + Rbs * Rr ^ 2 * Las);

af4 = @(x) x * (Ras * Lbs * Lr ^ 2 + Rbs * Las * Lr ^ 2 - Ras * Lr * Mb ^ 2 -
Rbs * Lr * Ma ^ 2);

```

```

r1 = @(x) -(x ^ 2) * (Rbs * Lr ^ 2 + 2 * Rr * Lbs * Lr - Rr * Mb ^ 2) + Rbs *
Rr ^ 2;
r2 = @(x) Rbs * Lr ^ 2;
r3 = @(x) -(x ^ 3) * (Lbs * Lr ^ 2 - Lr * Mb ^ 2) + x * (2 * Rbs * Rr * Lr +
Rr ^ 2 * Lbs);
r4 = @(x) x * (Lbs * Lr ^ 2 - Lr * Mb ^ 2);
r5 = @(x) 0;
r6 = @(x) -x * Rr * Ma * Mb;
r7 = @(x) (x ^ 2) * (Rbs * Lr * Ma + Rr * Lbs * Ma);
r8 = @(x) -Rbs * Lr * Ma;
r9 = @(x) -(x ^ 3) * (Ma * Mb ^ 2 - Lbs * Lr * Ma) - x * Rbs * Rr * Ma;
r10 = @(x) -x * (Lbs * Lr * Ma - Ma * Mb ^ 2);
r11 = @(x) Rbs * Rr * Ma;
r12 = @(x) x * Rr * Lbs * Ma;

r13 = @(x) 0;
r14 = @(x) x * Rr * Ma * Mb;
r15 = @(x) -(x ^ 2) * (Ras * Lr ^ 2 + 2 * Rr * Las * Lr - Rr * Ma ^ 2) + Ras
* Rr ^ 2;
r16 = @(x) Ras * Lr ^ 2;
r17 = @(x) -(x ^ 3) * (Las * Lr ^ 2 - Lr * Ma ^ 2) + x * (2 * Ras * Rr * Lr +
Rr ^ 2 * Las);
r18 = @(x) x * (Las * Lr ^ 2 - Lr * Ma ^ 2);
r19 = @(x) -Ras * Rr * Mb;
r20 = @(x) -x * Rr * Las * Mb;
r21 = @(x) (x ^ 2) * (Ras * Lr * Mb + Rr * Las * Mb);
r22 = @(x) -Ras * Lr * Mb;
r23 = @(x) -(x ^ 3) * (Ma ^ 2 * Mb - Las * Lr * Mb) - x * Ras * Rr * Mb;
r24 = @(x) -x * (Las * Lr * Mb - Ma ^ 2 * Mb);

R0 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;

R1 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R2 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R3 = @(x) x;
R4 = @(x) x * w;
R5 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R6 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R7 = @(x) x * w;
R8 = @(x) x * w;

R9 = @(x) x;
R10 = @(x) x * w;
R11 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R12 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R13 = @(x) x * w;
R14 = @(x) x * w;
R15 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;
R16 = @(x1, x2) x1 + x2 * w ^ 2;

% a, b, c, d, e, f

a = zeros(20, nWaves);

a(1, 1) = af1(S(1, 1));
a(2, 1) = af2(S(1, 1));
a(3, 1) = af3(S(1, 1));
a(4, 1) = af4(S(1, 1));

a(5, 1) = af1(S(2, 1));
a(6, 1) = af2(S(2, 1));
a(7, 1) = af3(S(2, 1));

```

```

a(8, 1) = af4(S(2, 1));

a(9, 1) = af1(S(3, 1));
a(10, 1) = af2(S(3, 1));
a(11, 1) = af3(S(3, 1));
a(12, 1) = af4(S(3, 1));

for k = 1:nWaves
    a(13, k) = af1(S(4, k));
    a(14, k) = af2(S(4, k));
    a(15, k) = af3(S(4, k));
    a(16, k) = af4(S(4, k));

    a(17, k) = af1(S(5, k));
    a(18, k) = af2(S(5, k));
    a(19, k) = af3(S(5, k));
    a(20, k) = af4(S(5, k));
end

b = zeros(12, 1);

b(1) = r1(S(1, 1));
b(2) = r2(S(1, 1));
b(3) = r3(S(1, 1));
b(4) = r4(S(1, 1));
b(5) = r5(S(1, 1));
b(6) = r6(S(1, 1));
b(7) = r7(S(1, 1));
b(8) = r8(S(1, 1));
b(9) = r9(S(1, 1));
b(10) = r10(S(1, 1));
b(11) = r11(S(1, 1));
b(12) = r12(S(1, 1));

c = zeros(12, 1);

c(1) = r1(S(2, 1));
c(2) = r2(S(2, 1));
c(3) = r3(S(2, 1));
c(4) = r4(S(2, 1));
c(5) = r5(S(2, 1));
c(6) = r6(S(2, 1));
c(7) = r7(S(2, 1));
c(8) = r8(S(2, 1));
c(9) = r9(S(2, 1));
c(10) = r10(S(2, 1));
c(11) = r11(S(2, 1));
c(12) = r12(S(2, 1));

d = zeros(12, 1);

d(1) = r13(S(3, 1));
d(2) = r14(S(3, 1));
d(3) = r15(S(3, 1));
d(4) = r16(S(3, 1));
d(5) = r17(S(3, 1));
d(6) = r18(S(3, 1));
d(7) = r19(S(3, 1));
d(8) = r20(S(3, 1));
d(9) = r21(S(3, 1));
d(10) = r22(S(3, 1));
d(11) = r23(S(3, 1));

```

```

d(12) = r24(S(3, 1));

e = zeros(12, nWaves);

for k = 1:nWaves
    e(1, k) = r13(S(4, k));
    e(2, k) = r14(S(4, k));
    e(3, k) = r15(S(4, k));
    e(4, k) = r16(S(4, k));
    e(5, k) = r17(S(4, k));
    e(6, k) = r18(S(4, k));
    e(7, k) = r19(S(4, k));
    e(8, k) = r20(S(4, k));
    e(9, k) = r21(S(4, k));
    e(10, k) = r22(S(4, k));
    e(11, k) = r23(S(4, k));
    e(12, k) = r24(S(4, k));
end

f = zeros(12, nWaves);

for k = 1:nWaves
    f(1, k) = r13(S(5, k));
    f(2, k) = r14(S(5, k));
    f(3, k) = r15(S(5, k));
    f(4, k) = r16(S(5, k));
    f(5, k) = r17(S(5, k));
    f(6, k) = r18(S(5, k));
    f(7, k) = r19(S(5, k));
    f(8, k) = r20(S(5, k));
    f(9, k) = r21(S(5, k));
    f(10, k) = r22(S(5, k));
    f(11, k) = r23(S(5, k));
    f(12, k) = r24(S(5, k));
end

% A, B, C, D, E, F

A = zeros(10, nWaves);

A(1, 1) = R0(a(1, 1), a(2, 1));
A(2, 1) = R0(a(3, 1), a(4, 1));
A(3, 1) = R0(a(5, 1), a(6, 1));
A(4, 1) = R0(a(7, 1), a(8, 1));
A(5, 1) = R0(a(9, 1), a(10, 1));
A(6, 1) = R0(a(11, 1), a(12, 1));

for k = 1:nWaves
    A(7, k) = R0(a(13, k), a(14, k));
    A(8, k) = R0(a(15, k), a(16, k));
    A(9, k) = R0(a(17, k), a(18, k));
    A(10, k) = R0(a(19, k), a(20, k));
end

B = zeros(8, 1);

B(1) = R1(b(1), b(2));
B(2) = R2(b(3), b(4));
B(3) = R3(b(5));
B(4) = R4(b(6));
B(5) = R5(b(7), b(8));
B(6) = R6(b(9), b(10));

```

```

B(7) = R7(b(11));
B(8) = R8(b(12));

C = zeros(8, 1);

C(1) = R1(c(1), c(2));
C(2) = R2(c(3), c(4));
C(3) = R3(c(5));
C(4) = R4(c(6));
C(5) = R5(c(7), c(8));
C(6) = R6(c(9), c(10));
C(7) = R7(c(11));
C(8) = R8(c(12));

D = zeros(8, 1);

D(1) = R9(d(1));
D(2) = R10(d(2));
D(3) = R11(d(3), d(4));
D(4) = R12(d(5), d(6));
D(5) = R13(d(7));
D(6) = R14(d(8));
D(7) = R15(d(9), d(10));
D(8) = R16(d(11), d(12));

E = zeros(8, nWaves);

for k = 1:nWaves
    E(1, k) = R9(e(1, k));
    E(2, k) = R10(e(2, k));
    E(3, k) = R11(e(3, k), e(4, k));
    E(4, k) = R12(e(5, k), e(6, k));
    E(5, k) = R13(e(7, k));
    E(6, k) = R14(e(8, k));
    E(7, k) = R15(e(9, k), e(10, k));
    E(8, k) = R16(e(11, k), e(12, k));
end

F = zeros(8, nWaves);

for k = 1:nWaves
    F(1, k) = R9(f(1, k));
    F(2, k) = R10(f(2, k));
    F(3, k) = R11(f(3, k), f(4, k));
    F(4, k) = R12(f(5, k), f(6, k));
    F(5, k) = R13(f(7, k));
    F(6, k) = R14(f(8, k));
    F(7, k) = R15(f(9, k), f(10, k));
    F(8, k) = R16(f(11, k), f(12, k));
end

T = zeros(5, 4, nWaves);
delta = zeros(5, 4, nWaves);

%
% T1n
%

for k = 1:4
    T(1, k, 1) = sqrt(((A(1, 1) * B(2 * k - 1, 1) + A(2, 1) * B(2 * k, 1)) ^
2) + ...

```

```

        ((A(1, 1) * B(2 * k, 1) - A(2, 1) * B(2 * k - 1, 1)) ^ 2)) / (2 *
(A(1, 1) ^ 2 + A(2, 1) ^ 2));

    delta(1, k, 1) = arg(A(1, 1) * B(2 * k, 1) - A(2, 1) * B(2 * k - 1, 1),
A(1, 1) * B(2 * k - 1, 1) + A(2, 1) * B(2 * k, 1));

    if isnan(delta(1, k, 1))
        delta(1, k, 1) = 0;
    end
end

%
% T2n
%

for k = 1:4
    T(2, k, 1) = sqrt(((A(3, 1) * C(2 * k - 1, 1) + A(4, 1) * C(2 * k, 1)) ^
2) + ...
        ((A(3, 1) * C(2 * k, 1) - A(4, 1) * C(2 * k - 1, 1)) ^ 2)) / (2 *
(A(3, 1) ^ 2 + A(4, 1) ^ 2));

    delta(2, k, 1) = arg(A(3, 1) * C(2 * k, 1) - A(4, 1) * C(2 * k - 1, 1),
A(3, 1) * C(2 * k - 1, 1) + A(4, 1) * C(2 * k, 1));

    if isnan(delta(2, k, 1))
        delta(2, k, 1) = 0;
    end
end

%
% T3n
%

for k = 1:4
    T(3, k, 1) = sqrt(((A(5, 1) * D(2 * k - 1, 1) + A(6, 1) * D(2 * k, 1)) ^
2) + ...
        ((A(6, 1) * D(2 * k - 1, 1) - A(5, 1) * D(2 * k, 1)) ^ 2)) / (2 *
(A(5, 1) ^ 2 + A(6, 1) ^ 2));

    delta(3, k, 1) = arg(A(5, 1) * D(2 * k - 1, 1) + A(6, 1) * D(2 * k, 1),
A(6, 1) * D(2 * k - 1, 1) - A(5, 1) * D(2 * k, 1));

    if isnan(delta(3, k, 1))
        delta(3, k, 1) = 0;
    end
end

%
% T4nk
%

for k = 1:4
    for l = 1:nWaves
        T(4, k, 1) = sqrt(((A(7, 1) * E(2 * k - 1, 1) + A(8, 1) * E(2 * k,
1)) ^ 2) + ...
            ((A(7, 1) * E(2 * k, 1) - A(8, 1) * E(2 * k - 1, 1)) ^ 2)) / ((2
* l - 1) * (A(7, 1) ^ 2 + A(8, 1) ^ 2));

        delta(4, k, 1) = arg(A(7, 1) * E(2 * k, 1) - A(8, 1) * E(2 * k - 1,
1), A(7, 1) * E(2 * k - 1, 1) + A(8, 1) * E(2 * k, 1));
    end
end

```

```

        if isnan(delta(4, k, 1))
            delta(4, k, 1) = 0;
        end
    end
end

for k = 1:4
    for l = 1:nWaves
        T(5, k, 1) = sqrt(((A(9, 1) * F(2 * k - 1, 1) + A(10, 1) * F(2 * k,
1)) ^ 2) + ...
            ((A(9, 1) * F(2 * k, 1) - A(10, 1) * F(2 * k - 1, 1)) ^ 2)) / ((2
* 1 - 1) * (A(9, 1) ^ 2 + A(10, 1) ^ 2));

        delta(5, k, 1) = arg(A(9, 1) * F(2 * k, 1) - A(10, 1) * F(2 * k - 1,
1), A(9, 1) * F(2 * k - 1, 1) + A(10, 1) * F(2 * k, 1));

        if isnan(delta(5, k, 1))
            delta(5, k, 1) = 0;
        end
    end
end

%
% Освобождаем память
%

clear('A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F');

%
% Для расчёта энергетических характеристик
%

TempT = T;
TempDelta = delta;

t = zeros(1, Steps);

for k = 1:Steps
    t(k) = (Step * (k - 1)) + StartTime;
end

ias = zeros(1, Steps);
ibs = zeros(1, Steps);
iar = zeros(1, Steps);
ibr = zeros(1, Steps);

for k = 1:4% Перебираем токи
    for l = 1:Steps% Шаги
        y = Um1 * (T(1, k, 1) * sin((w1 - Omega) * t(1) + delta(1, k, 1)) +
T(2, k, 1) * sin((w1 + Omega) * t(1) + delta(2, k, 1))) + ...
            Um2 * T(3, k, 1) * sin(w1 * t(1) + delta(3, k, 1));

        for m = 1:nWaves% Гармоники
            y = y + (Um2 / pi) * T(4, k, m) * sin(((2 * m - 1) * Omega - w1)
* t(1) + delta(4, k, m));
            y = y + (Um2 / pi) * T(5, k, m) * sin(((2 * m - 1) * Omega + w1)
* t(1) + delta(5, k, m));
        end

        switch k
            case 1

```

```

        ias(1) = y;

    case 2
        ibs(1) = y;

    case 3
        iar(1) = y;

    case 4
        ibr(1) = y;
    end
end
end

%figure();
plot(t, ias, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('ias(t)');

%figure();
plot(t, ibs, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('ibs(t)');

%figure();
plot(t, iar, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('iar(t)');

%figure();
plot(t, ibr, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('ibr(t)');

Mem = kd .* (Ma .* ias .* ibr - Mb .* ibs .* iar);

%figure();
plot(t, Mem, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('Mem(t)');

% [X, Y, Z] = SolveDisp(Lmex, Rmex, Cmex, Mem, Step, 0, 0);
%
% %figure();
% plot(t, X, 'LineWidth', 2);
% grid();
%
% %figure();
% plot(t, Y, 'LineWidth', 2);
% grid();
%
% %figure();
% plot(t, Z, 'LineWidth', 2);
% grid();

% ss = Steps;
%
% fs = zeros(1, ss);
% Y = zeros(ss, 1);
%
% fss = 1 / (Step * Steps);
%
```

```

% for k = 0:ss - 1
%     fs(k + 1) = k * fss;
% end
%
% X = CurrentSpectrum(ias, ibs, iar, ibr, ss);
%
% %figure();
% bar(fs, X);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 1);
% end
%
% %figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 2);
% end
%
% %figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 3);
% end
%
% %figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% for k = 1:ss
%     Y(k) = X(k, 4);
% end
%
% %figure();
% bar(fs, Y);
% grid();
%
% clear('X', 'Y', 'Z');
%
%
%
%
%
% Четырёхмерные массивы (индексы):
% 1.1. 1 - частота вращения 0.
% 1.2. 2 - производная от тока, частота вращения 0.
% 2. Номер компонента тока.
% 3. Номер тока.
% 3.1. ias.
% 3.2. ibs.
% 3.3. iar.
% 3.4. ibr.
% 4. Гармоники.
%
%
T = zeros(2, 4, 4, nWaves);
delta = zeros(2, 4, 4, nWaves);

```

```

T(1, 1, 1, 1) = (1 / 2) * sqrt((b(1) ^ 2 + b(3) ^ 2) / (a(1, 1) ^ 2 + a(3, 1)
^ 2));
delta(1, 1, 1, 1) = arg(a(1, 1) * b(3) - a(3, 1) * b(1), a(1, 1) * b(1) +
a(3, 1) * b(3));

if isnan(delta(1, 1, 1, 1))
    delta(1, 1, 1, 1) = 0;
end

T(1, 2, 1, 1) = (1 / 2) * sqrt((c(1) ^ 2 + c(3) ^ 2) / (a(5, 1) ^ 2 + a(7, 1)
^ 2));
delta(1, 2, 1, 1) = arg(a(5, 1) * c(3) - a(7, 1) * c(1), a(5, 1) * c(1) +
a(7, 1) * c(3));

if isnan(delta(1, 2, 1, 1))
    delta(1, 2, 1, 1) = 0;
end

T(1, 3, 1, 1) = 0;
delta(1, 3, 1, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(1, 4, 1, k) = 0;
    delta(1, 4, 1, k) = 0;
    T(1, 5, 1, k) = 0;
    delta(1, 5, 1, k) = 0;
end

T(1, 1, 2, 1) = 0;
delta(1, 1, 2, 1) = 0;
T(1, 2, 2, 1) = 0;
delta(1, 2, 2, 1) = 0;

T(1, 3, 2, 1) = (1 / 2) * sqrt((d(3) ^ 2 + d(5) ^ 2) / (a(9, 1) ^ 2 + a(11,
1) ^ 2));
delta(1, 3, 2, 1) = arg(a(9, 1) * d(3) + a(11, 1) * d(5), a(11, 1) * d(3) -
a(9, 1) * d(5));

for k = 1:nWaves
    T(1, 4, 2, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((e(3, k) ^ 2 + e(5, k) ^ 2) /
(a(13, k) ^ 2 + a(15, k) ^ 2));
    delta(1, 4, 2, k) = arg(a(13, k) * e(5, k) - a(15, k) * e(3, k), a(13, k)
* e(3, k) + a(15, k) * e(5, k));

    if isnan(delta(1, 4, 2, k))
        delta(1, 4, 2, k) = 0;
    end

    T(1, 5, 2, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((f(3, k) ^ 2 + f(5, k) ^ 2) /
(a(17, k) ^ 2 + a(19, k) ^ 2));
    delta(1, 5, 2, k) = arg(a(17, k) * f(5, k) - a(19, k) * f(3, k), a(17, k)
* f(3, k) + a(19, k) * f(5, k));

    if isnan(delta(1, 5, 2, k))
        delta(1, 5, 2, k) = 0;
    end
end

T(1, 1, 3, 1) = (1 / 2) * sqrt((b(7) ^ 2 + b(9) ^ 2) / (a(1, 1) ^ 2 + a(3, 1)
^ 2));

```

```

delta(1, 1, 3, 1) = arg(a(1, 1) * b(9) - a(3, 1) * b(7), a(1, 1) * b(7) +
a(3, 1) * b(9));

if isnan(delta(1, 1, 3, 1))
    delta(1, 1, 3, 1) = 0;
end

T(1, 2, 3, 1) = (1 / 2) * sqrt((c(7) ^ 2 + c(9) ^ 2) / (a(5, 1) ^ 2 + a(7, 1)
^ 2));
delta(1, 2, 3, 1) = arg(a(5, 1) * c(9) - a(7, 1) * c(7), a(5, 1) * c(7) +
a(7, 1) * c(9));

if isnan(delta(1, 2, 3, 1))
    delta(1, 2, 3, 1) = 0;
end

T(1, 3, 3, 1) = 0;
delta(1, 3, 3, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(1, 4, 3, 1) = 0;
    delta(1, 4, 3, 1) = 0;
    T(1, 5, 3, 1) = 0;
    delta(1, 5, 3, 1) = 0;
end

T(1, 1, 4, 1) = 0;
delta(1, 1, 4, 1) = 0;
T(1, 2, 4, 1) = 0;
delta(1, 2, 4, 1) = 0;

T(1, 3, 4, 1) = (1 / 2) * sqrt((d(9) ^ 2 + d(11) ^ 2) / (a(9, 1) ^ 2 + a(11,
1) ^ 2));
delta(1, 3, 4, 1) = arg(a(9, 1) * d(9) + a(11, 1) * d(11), a(11, 1) * d(9) -
a(9, 1) * d(11));

if isnan(delta(1, 3, 4, 1))
    delta(1, 3, 4, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    T(1, 4, 4, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((e(9, k) ^ 2 + e(11, k) ^ 2) /
(a(13, k) ^ 2 + a(15, k) ^ 2));
    delta(1, 4, 4, k) = arg(a(13, k) * e(11, k) - a(15, k) * e(9, k), a(13,
k) * e(9, k) + a(15, k) * e(11, k));

    if isnan(delta(1, 4, 4, k))
        delta(1, 4, 4, k) = 0;
    end

    T(1, 5, 4, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((f(9, k) ^ 2 + f(11, k) ^ 2) /
(a(17, k) ^ 2 + a(19, k) ^ 2));
    delta(1, 5, 4, k) = arg(a(17, k) * f(11, k) - a(19, k) * f(9, k), a(17,
k) * f(9, k) + a(19, k) * f(11, k));

    if isnan(delta(1, 5, 4, k))
        delta(1, 5, 4, k) = 0;
    end
end

T(2, 1, 1, 1) = 0;

```

```

delta(2, 1, 1, 1) = 0;
T(2, 2, 1, 1) = 0;
delta(2, 2, 1, 1) = 0;

T(2, 3, 1, 1) = d(2) / (2 * (a(9, 1) ^ 2 + a(11, 1) ^ 2));
delta(2, 3, 1, 1) = arg(-a(9, 1), a(11, 1));

for k = 1:nWaves
    T(2, 4, 1, k) = e(2, 1) / ((2 * k - 1) * (a(13, k) ^ 2 + a(15, k) ^ 2));
    delta(2, 4, 1, k) = arg(-a(13, k), a(15, k));

    if isnan(delta(2, 4, 1, k))
        delta(2, 4, 1, k) = 0;
    end

    T(2, 5, 1, k) = f(2, 1) / ((2 * k - 1) * (a(17, k) ^ 2 + a(19, k) ^ 2));
    delta(2, 5, 1, k) = arg(-a(17, k), a(19, k));

    if isnan(delta(2, 5, 1, k))
        delta(2, 5, 1, k) = 0;
    end
end

T(2, 1, 2, 1) = b(6) / (2 * (a(1, 1) ^ 2 + a(3, 1) ^ 2));
delta(2, 1, 2, 1) = arg(a(1, 1), a(3, 1));

if isnan(delta(2, 1, 2, 1))
    delta(2, 1, 2, 1) = 0;
end

T(2, 2, 2, 1) = c(6) / (2 * (a(5, 1) ^ 2 + a(7, 1) ^ 2));
delta(2, 2, 2, 1) = arg(a(5, 1), a(7, 1));

if isnan(delta(2, 2, 2, 1))
    delta(2, 2, 2, 1) = 0;
end

T(2, 3, 2, 1) = 0;
delta(2, 3, 2, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(2, 4, 2, k) = 0;
    delta(2, 4, 2, k) = 0;
    T(2, 5, 2, k) = 0;
    delta(2, 5, 2, k) = 0;
end

T(2, 1, 3, 1) = 0;
delta(2, 1, 3, 1) = 0;
T(2, 2, 3, 1) = 0;
delta(2, 2, 3, 1) = 0;

T(2, 3, 3, 1) = (1 / 2) * sqrt((d(7) ^ 2 + d(8) ^ 2) / (a(9, 1) ^ 2 + a(11, 1) ^ 2));
delta(2, 3, 3, 1) = arg(a(9, 1) * d(7) + a(11, 1) * d(8), a(11, 1) * d(7) - a(9, 1) * d(8));

if isnan(delta(2, 3, 3, 1))
    delta(2, 3, 3, 1) = 0;
end

```

```

for k = 1:nWaves
    T(2, 4, 3, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((e(7, 1) ^ 2 + e(8, k) ^ 2) /
(a(13, k) ^ 2 + a(15, k) ^ 2));
    delta(2, 4, 3, k) = arg(a(13, k) * e(7, 1) + a(15, k) * e(8, k), a(15, k)
* e(7, 1) - a(13, k) * e(8, k));

    if isnan(delta(2, 4, 3, k))
        delta(2, 4, 3, k) = 0;
    end

    T(2, 5, 3, k) = (1 / (2 * k - 1)) * sqrt((f(7, 1) ^ 2 + f(8, k) ^ 2) /
(a(17, k) ^ 2 + a(19, k) ^ 2));
    delta(2, 5, 3, k) = arg(a(17, k) * f(7, 1) + a(19, k) * f(8, k), a(19, k)
* f(7, 1) - a(17, k) * f(8, k));

    if isnan(delta(2, 5, 3, k))
        delta(2, 5, 3, k) = 0;
    end
end

T(2, 1, 4, 1) = (1 / 2) * sqrt((b(11) ^ 2 + b(12) ^ 2) / (a(1, 1) ^ 2 + a(3,
1) ^ 2));
delta(2, 1, 4, 1) = arg(a(1, 1) * b(12) - a(3, 1) * b(11), a(1, 1) * b(11) +
a(3, 1) * b(12));

if isnan(delta(2, 1, 4, 1))
    delta(2, 1, 4, 1) = 0;
end

T(2, 2, 4, 1) = (1 / 2) * sqrt((c(11) ^ 2 + c(12) ^ 2) / (a(5, 1) ^ 2 + a(7,
1) ^ 2));
delta(2, 2, 4, 1) = arg(a(5, 1) * c(12) - a(7, 1) * c(11), a(5, 1) * c(11) +
a(7, 1) * c(12));

if isnan(delta(2, 2, 4, 1))
    delta(2, 2, 4, 1) = 0;
end

T(2, 3, 4, 1) = 0;
delta(2, 3, 4, 1) = 0;

for k = 1:nWaves
    T(2, 4, 4, k) = 0;
    delta(2, 4, 4, k) = 0;
    T(2, 5, 4, k) = 0;
    delta(2, 5, 4, k) = 0;
end

Ms = zeros(1, Steps);

N = zeros(3, 3, nWaves);
fi = zeros(3, 3, nWaves);

N(1, 2, 1) = (kd * Ma * Um1 * Um2 * T(1, 3, 4, 1) / 2) * sqrt(T(1, 1, 1, 1) ^
2 + T(1, 2, 1, 1) ^ 2 + ...
    2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 2, 1, 1) * cos(2 * delta(1, 3, 4, 1) - delta(1,
1, 1, 1) - delta(1, 2, 1, 1)));

N(1, 3, 1) = (kd * Mb * Um1 * Um2 * T(1, 3, 2, 1) / 2) * sqrt(T(1, 1, 3, 1) ^
2 + T(1, 2, 3, 1) ^ 2 + ...

```

```

    2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 2, 3, 1) * cos(2 * delta(1, 3, 2, 1) - delta(1,
1, 3, 1) - delta(1, 2, 3, 1)));

fi(1, 2, 1) = arg(T(1, 1, 1, 1) * sin(delta(1, 3, 4, 1) - delta(1, 1, 1, 1))
+ T(1, 2, 1, 1) * sin(delta(1, 2, 1, 1) - delta(1, 3, 4, 1)), ...
    T(1, 1, 1, 1) * cos(delta(1, 3, 4, 1) - delta(1, 1, 1, 1)) + T(1, 2, 1,
1) * cos(delta(1, 2, 1, 1) - delta(1, 3, 4, 1))) + pi / 2;

if isnan(fi(1, 2, 1))
    fi(1, 2, 1) = 0;
end

fi(1, 3, 1) = arg(-(T(1, 1, 3, 1) * sin(delta(1, 3, 2, 1) - delta(1, 1, 3,
1)) + T(1, 2, 3, 1) * sin(delta(1, 2, 3, 1) - delta(1, 3, 2, 1))), ...
    -(T(1, 1, 3, 1) * cos(delta(1, 3, 2, 1) - delta(1, 1, 3, 1)) + T(1, 2, 3,
1) * cos(delta(1, 2, 3, 1) - delta(1, 3, 2, 1)))) + pi / 2;

if isnan(fi(1, 3, 1))
    fi(1, 3, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    N(2, 2, k) = ((kd * Ma * Um1 * Um2) / (2 * pi)) * sqrt(T(1, 1, 1, 1) ^ 2
* T(1, 5, 4, k) ^ 2 + T(1, 2, 1, 1) ^ 2 * T(1, 4, 4, k) ^ 2 - ...
    2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 2, 1, 1) * T(1, 4, 4, k) * T(1, 5, 4, k) *
cos(delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 2, 1, 1) + delta(1, 4, 4, k) - ...
    delta(1, 5, 4, k)));

    N(2, 3, k) = ((kd * Mb * Um1 * Um2) / (2 * pi)) * sqrt(T(1, 1, 3, 1) ^ 2
* T(1, 5, 2, k) ^ 2 + T(1, 2, 3, 1) ^ 2 * T(1, 4, 2, k) ^ 2 - ...
    2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 2, 3, 1) * T(1, 4, 2, k) * T(1, 5, 2, k) *
cos(delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 2, 3, 1) + delta(1, 4, 2, k) - ...
    delta(1, 5, 2, k)));

    fi(2, 2, k) = arg(T(1, 1, 1, 1) * T(1, 5, 4, k) * sin(delta(1, 5, 4, k) -
delta(1, 1, 1, 1)) - T(1, 2, 1, 1) * T(1, 4, 4, k) * ...
    sin(delta(1, 2, 1, 1) + delta(1, 4, 4, k)), T(1, 1, 1, 1) * T(1, 5,
4, k) * cos(delta(1, 5, 4, k) - delta(1, 1, 1, 1)) - ...
    T(1, 2, 1, 1) * T(1, 4, 4, k) * cos(delta(1, 2, 1, 1) + delta(1, 4,
4, k))) + pi / 2;

    if isnan(fi(2, 2, k))
        fi(2, 2, k) = 0;
    end

    fi(2, 3, k) = arg(T(1, 2, 3, 1) * T(1, 4, 2, k) * sin(delta(1, 2, 3, 1) +
delta(1, 4, 2, k)) - T(1, 1, 3, 1) * T(1, 5, 2, k) * ...
    sin(delta(1, 5, 2, k) - delta(1, 1, 3, 1)), T(1, 2, 3, 1) * T(1, 4,
2, k) * cos(delta(1, 2, 3, 1) + delta(1, 4, 2, k)) - ...
    T(1, 1, 3, 1) * T(1, 5, 2, k) * cos(delta(1, 5, 2, k) - delta(1, 1,
3, 1))) + pi / 2;

    if isnan(fi(2, 3, k))
        fi(2, 3, k) = 0;
    end

    N(3, 2, k) = ((kd * Ma * Um1 * Um2) / (2 * pi)) * sqrt(T(1, 1, 1, 1) ^ 2
* T(1, 4, 4, k) ^ 2 + T(1, 2, 1, 1) ^ 2 * T(1, 5, 4, k) ^ 2 - ...
    2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 2, 1, 1) * T(1, 4, 4, k) * T(1, 5, 4, k) *
cos(delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 2, 1, 1) + delta(1, 4, 4, k) - ...
    delta(1, 5, 4, k)));

```

```

    N(3, 3, k) = ((kd * Mb * Um1 * Um2) / (2 * pi)) * sqrt(T(1, 1, 3, 1) ^ 2
* T(1, 4, 2, k) ^ 2 + T(1, 2, 3, 1) ^ 2 * T(1, 5, 2, k) ^ 2 - ...
    2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 2, 3, 1) * T(1, 4, 2, k) * T(1, 5, 2, k) *
cos(delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 2, 3, 1) + delta(1, 4, 2, k) - ...
    delta(1, 5, 2, k)));

    fi(3, 2, k) = arg(T(1, 2, 1, 1) * T(1, 5, 4, k) * sin(delta(1, 5, 4, k) -
delta(1, 2, 1, 1)) - T(1, 1, 1, 1) * T(1, 4, 4, k) * ...
    sin(delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 4, 4, k)), T(1, 2, 1, 1) * T(1, 5,
4, k) * cos(delta(1, 5, 4, k) - delta(1, 2, 1, 1)) - ...
    T(1, 1, 1, 1) * T(1, 4, 4, k) * cos(delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 4,
4, k))) + pi / 2;

    if isnan(fi(3, 2, k))
        fi(3, 2, k) = 0;
    end

    fi(3, 3, k) = arg(T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4, 2, k) * sin(delta(1, 1, 3, 1) +
delta(1, 4, 2, k)) - T(1, 2, 3, 1) * T(1, 5, 2, k) * ...
    sin(delta(1, 5, 2, k) - delta(1, 2, 3, 1)), T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4,
2, k) * cos(delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 4, 2, k)) - ...
    T(1, 2, 3, 1) * T(1, 5, 2, k) * cos(delta(1, 5, 2, k) - delta(1, 2,
3, 1))) + pi / 2;

    if isnan(fi(3, 3, k))
        fi(3, 3, k) = 0;
    end
end

N(1, 1, 1) = sqrt(N(1, 2, 1) ^ 2 + N(1, 3, 1) ^ 2 + 2 * N(1, 2, 1) * N(1, 3,
1) * cos(fi(1, 2, 1) - fi(1, 3, 1)));
fi(1, 1, 1) = arg(N(1, 2, 1) * sin(fi(1, 2, 1)) + N(1, 3, 1) * sin(fi(1, 3,
1)), N(1, 2, 1) * cos(fi(1, 2, 1)) + N(1, 3, 1) * ...
    cos(fi(1, 3, 1)));

if isnan(fi(1, 1, 1))
    fi(1, 1, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    N(2, 1, k) = sqrt(N(2, 2, k) ^ 2 + N(2, 3, k) ^ 2 + 2 * N(2, 2, k) * N(2,
3, k) * cos(fi(2, 2, k) - fi(2, 3, k)));
    fi(2, 1, k) = arg(N(2, 2, k) * sin(fi(2, 2, k)) + N(2, 3, k) * sin(fi(2,
3, k)), N(2, 2, k) * cos(fi(2, 2, k)) + N(2, 3, k) * ...
        cos(fi(2, 3, k)));

    if isnan(fi(2, 1, k))
        fi(2, 1, k) = 0;
    end

    N(3, 1, k) = sqrt(N(3, 2, k) ^ 2 + N(3, 3, k) ^ 2 + 2 * N(3, 2, k) * N(3,
3, k) * cos(fi(3, 2, k) - fi(3, 3, k)));
    fi(3, 1, k) = arg(N(3, 2, k) * sin(fi(3, 2, k)) + N(3, 3, k) * sin(fi(3,
3, k)), N(3, 2, k) * cos(fi(3, 2, k)) + N(3, 3, k) * ...
        cos(fi(3, 3, k)));

    if isnan(fi(3, 1, k))
        fi(3, 1, k) = 0;
    end
end
end

```

```

%
% Пусковой момент
%

for k = 1:Steps
    Ms(k) = N(1, 1, 1) * sin(Omega * t(k) + fi(1, 1, 1));

    for l = 1:nWaves
        Ms(k) = Ms(k) + N(2, 1, 1) * sin(2 * l * Omega * t(k) + fi(2, 1, 1))
+ N(3, 1, 1) * sin((2 * l - 2) * Omega * t(k) + fi(3, 1, 1));
    end
end

%
% Расчёт пускового момента без упрощений
%

% for k = 1:Steps
%     Ms(k) = kd * (Ma * ((Um1 * Um2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 3, 4, 1) / 2) *
% (cos(Omega * t(k) - delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 3, 4, 1)) - ...
%     cos((2 * w1 - Omega) * t(k) + delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 3, 4,
% 1))) + ...
%     (Um1 * Um2 * T(1, 2, 1, 1) * T(1, 3, 4, 1) / 2) * (cos(Omega * t(k)
+ delta(1, 2, 1, 1) - delta(1, 3, 4, 1)) - ...
%     cos((2 * w1 + Omega) * t(k) + delta(1, 2, 1, 1) + delta(1, 3, 4,
% 1)))) - ...
%     Mb * ((Um1 * Um2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 3, 2, 1) / 2) * (cos(Omega
* t(k) - delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 3, 2, 1)) - ...
%     cos((2 * w1 - Omega) * t(k) + delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 3, 2,
% 1))) + ...
%     (Um1 * Um2 * T(1, 2, 3, 1) * T(1, 3, 2, 1) / 2) * (cos(Omega * t(k)
+ delta(1, 2, 3, 1) - delta(1, 3, 2, 1)) - ...
%     cos((2 * w1 + Omega) * t(k) + delta(1, 2, 3, 1) + delta(1, 3, 2,
% 1)))));
%
%     for l = 1:nWaves
%         Ms(k) = Ms(k) + ((kd * Ma) / (2 * pi)) * ((Um1 * Um2 * T(1, 1, 1,
% 1) * T(1, 4, 4, 1)) * ...
%         (cos((2 * w1 - 2 * l * Omega) * t(k) + delta(1, 1, 1, 1) -
delta(1, 4, 4, 1)) - ...
%         cos((2 * l - 2) * Omega * t(k) + delta(1, 1, 1, 1) + delta(1,
% 4, 4, 1))) + ...
%         (Um1 * Um2 * T(1, 1, 1, 1) * T(1, 5, 4, 1)) * (cos(2 * l *
Omega * t(k) - delta(1, 1, 1, 1) + delta(1, 5, 4, 1)) - ...
%         cos((2 * w1 + (2 * l - 2) * Omega) * t(k) + delta(1, 1, 1, 1) +
delta(1, 5, 4, 1))) + ...
%         (Um1 * Um2 * T(1, 2, 1, 1) * T(1, 4, 4, 1)) * (cos((2 * w1 - (2
* l - 2) * Omega) * t(k) + delta(1, 2, 1, 1) - ...
%         delta(1, 4, 4, 1)) - cos(2 * l * Omega * t(k) + delta(1, 2, 1,
% 1) + delta(1, 4, 4, 1))) + ...
%         (Um1 * Um2 * T(1, 2, 1, 1) * T(1, 5, 4, 1)) * (cos((2 * l - 2)
* Omega * t(k) - delta(1, 2, 1, 1) + delta(1, 5, 4, 1)) - ...
%         cos((2 * w1 + 2 * l * Omega) * t(k) + delta(1, 2, 1, 1) +
delta(1, 5, 4, 1)))) - ...
%         ((kd * Mb) / (2 * pi)) * ((Um1 * Um2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 4,
% 2, 1)) * (cos((2 * w1 - 2 * l * Omega) * t(k) + ...
%         delta(1, 1, 3, 1) - delta(1, 4, 2, 1)) - cos((2 * l - 2) *
Omega * t(k) + delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 4, 2, 1))) + ...
%         (Um1 * Um2 * T(1, 2, 3, 1) * T(1, 4, 2, 1)) * (cos((2 * w1 - (2
* l - 2) * Omega) * t(k) + delta(1, 2, 3, 1) - ...
%         delta(1, 4, 2, 1)) - cos(2 * l * Omega * t(k) + delta(1, 2, 3,
% 1) + delta(1, 4, 2, 1))) + ...

```

```

%      (Um1 * Um2 * T(1, 1, 3, 1) * T(1, 5, 2, 1)) * (cos(2 * l *
Omega * t(k) - delta(1, 1, 3, 1) + delta(1, 5, 2, 1)) - ...
%      cos((2 * w1 + (2 * l - 2) * Omega) * t(k) + delta(1, 1, 3, 1) +
delta(1, 5, 2, 1))) + ...
%      (Um1 * Um2 * T(1, 2, 3, 1) * T(1, 5, 2, 1)) * (cos((2 * l - 2)
* Omega * t(k) - delta(1, 2, 3, 1) + delta(1, 5, 2, 1)) - ...
%      cos((2 * w1 + 2 * l * Omega) * t(k) + delta(1, 2, 3, 1) +
delta(1, 5, 2, 1)))));
%      end
% end

%figure();
plot(t, Ms, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('Ms(t)');

%
% Демпфирующий момент
%

Md = kd * w * (Ma * ((Um2 ^ 2 * T(1, 3, 4, 1) * T(2, 3, 1, 1) / 2) *
cos(delta(2, 3, 1, 1) - delta(1, 3, 4, 1)) + ...
(Um1 ^ 2 * T(1, 1, 1, 1) * T(2, 1, 4, 1) / 2) * cos(delta(1, 1, 1, 1) -
delta(2, 1, 4, 1)) + ...
(Um1 ^ 2 * T(1, 2, 1, 1) * T(2, 2, 4, 1) / 2) * cos(delta(1, 2, 1, 1) -
delta(2, 2, 4, 1))) - ...
Mb * ((Um1 ^ 2 * T(1, 1, 3, 1) * T(2, 1, 2, 1) / 2) * cos(delta(2, 1, 2,
1) - delta(1, 1, 3, 1)) + ...
(Um1 ^ 2 * T(1, 2, 3, 1) * T(2, 2, 2, 1) / 2) * cos(delta(2, 2, 2, 1) -
delta(1, 2, 3, 1)) + ...
(Um2 ^ 2 * T(1, 3, 2, 1) * T(2, 3, 3, 1) / 2) * cos(delta(1, 3, 2, 1) -
delta(2, 3, 3, 1))));
Fd = Md / w;

if isnan(Fd)
    Fd = 0;
end

%
% Освобождаем память
%

clear('T', 'delta');

N(1, 2, 1) = N(1, 1, 1) * cos(fi(1, 1, 1));
N(1, 1, 1) = N(1, 1, 1) * sin(fi(1, 1, 1));

for k = 1:nWaves
    N(2, 2, k) = N(2, 1, k) * cos(fi(2, 1, k));
    N(2, 1, k) = N(2, 1, k) * sin(fi(2, 1, k));
    N(3, 2, k) = N(3, 1, k) * cos(fi(3, 1, k));
    N(3, 1, k) = N(3, 1, k) * sin(fi(3, 1, k));
end

%
% Внимание! Метод гармонического баланса применим только при расчёте
периодических функций перемещения и не может быть применён при
% расчёте непериодических функций, например шаговой. Для расчёта
непериодических функций перемещения рекомендуется использовать численные
% методы.
%
```

```

XI = zeros(3, nWaves);
alpha = zeros(3, nWaves);

XI1 = (N(1, 1, 1) * (Cmex - Lmex * Omega ^ 2) - N(1, 2, 1) * (Rmex - Fd) *
Omega) / ...
    ((Cmex - Lmex * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^ 2 * Omega ^ 2);

XI2 = (N(1, 2, 1) * (Cmex - Lmex * Omega ^ 2) + N(1, 1, 1) * (Rmex - Fd) *
Omega) / ...
    ((Cmex - Lmex * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^ 2 * Omega ^ 2);

XI(1, 1) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
alpha(1, 1) = arg(XI1, XI2);

if isnan(alpha(1, 1))
    alpha(1, 1) = 0;
end

for k = 1:nWaves
    XI1 = (N(2, 1, k) * (Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) - 2 * N(2, 2,
k) * (Rmex - Fd) * k * Omega) / ...
        ((Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + 4 * (Rmex - Fd) ^ 2 * k
^ 2 * Omega ^ 2);

    XI2 = (N(2, 2, k) * (Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) + 2 * N(2, 1,
k) * (Rmex - Fd) * k * Omega) / ...
        ((Cmex - 4 * Lmex * k ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + 4 * (Rmex - Fd) ^ 2 * k
^ 2 * Omega ^ 2);

    XI(2, k) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
    alpha(2, k) = arg(XI1, XI2);

    if isnan(alpha(2, k))
        alpha(2, k) = 0;
    end

    if k ~= 1 || Cmex
        XI1 = (N(3, 1, k) * (Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) -
N(3, 2, k) * (Rmex - Fd) * (2 * k - 2) * Omega) / ...
            ((Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^
2 * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2);

        XI2 = (N(3, 2, k) * (Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) +
N(3, 1, k) * (Rmex - Fd) * (2 * k - 2) * Omega) / ...
            ((Cmex - Lmex * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2) ^ 2 + (Rmex - Fd) ^
2 * (2 * k - 2) ^ 2 * Omega ^ 2);

        XI(3, k) = sqrt(XI1 ^ 2 + XI2 ^ 2);
        alpha(3, k) = arg(XI1, XI2);

        if isnan(alpha(3, k))
            alpha(3, k) = 0;
        end
    else
        XI(3, k) = 0;
        alpha(3, k) = 0;
    end
end

end

XI0 = zeros(1, Steps);

```

```

for k = 1:Steps% Шаги
    XI0(k) = XI(1, 1) * sin(Omega * t(k) + alpha(1, 1));

    for l = 1:nWaves% Гармоники
        XI0(k) = XI0(k) + XI(2, l) * sin(2 * l * Omega * t(k) + alpha(2, l))
+ XI(3, l) * sin((2 * l - 2) * Omega * t(k) + alpha(3, l));
    end
end

%[E, w, XI0] = SolveDisp(Lmex, Rmex, Cmex, Ms, Step, 0, 0);

%figure();
plot(t, XI0 - XI0(1), 'LineWidth', 2);
grid();
legend('XI0(t)');

%
% Рассчёт энергетических характеристик
%

Mem = zeros(1, Steps);
w = zeros(1, Steps);

T = TempT;
delta = TempDelta;
clear('TempT', 'TempDelta');

Tx = 2 * pi / Omega;
Sx = Tx / Step;

Uas = zeros(1, Steps);
Ubs = zeros(1, Steps);

for k = 1:Steps
    A = 0;

    if sin(Omega * t(k)) > 0
        A = 1;
    end

    Uas(k) = Um1 * sin(w1 * t(k)) * cos(Omega * t(k));
    Ubs(k) = Um2 * cos(w1 * t(k)) * A;
end

Pld = Uas .* ias + Ubs .* ibs;

plot(t, Pld, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('P1(t)');

P1p = 0;

for k = 1:Sx
    P1p = P1p + Pld(k) * Step;
end

P1p = P1p / Tx;
P1 = 0;

for k = 1:2

```

```

switch k
    case 1
        tx = Tx;

    case 2
        tx = 0;
end

F1 = (Um1 ^ 2 / 4) * (T(1, 1, 1) * (cos(delta(1, 1, 1)) * tx - sin(2 *
(w1 - Omega) * tx + delta(1, 1, 1)) / (2 * (w1 - Omega))) + ...
T(2, 1, 1) * (sin(2 * Omega * tx + delta(2, 1, 1)) / (2 * Omega) -
sin(2 * w1 * tx + delta(2, 1, 1)) / (2 * w1))) + ...
(Um1 * Um2 / 4) * (T(3, 1, 1) * (sin(Omega * tx + delta(3, 1, 1)) /
Omega - sin((2 * w1 - Omega) * tx + delta(3, 1, 1)) / (2 * w1 - Omega))) +
...
(Um1 ^ 2 / 4) * (T(1, 1, 1) * (sin(2 * Omega * tx - delta(1, 1, 1)) /
(2 * Omega) - sin(2 * w1 * tx + delta(1, 1, 1)) / (2 * w1))) + ...
T(2, 1, 1) * (cos(delta(2, 1, 1)) * tx - sin(2 * (w1 + Omega) * tx +
delta(2, 1, 1)) / (2 * (w1 + Omega)))) + ...
(Um1 * Um2 / 4) * (T(3, 1, 1) * (sin(Omega * tx - delta(3, 1, 1)) /
Omega - sin((2 * w1 + Omega) * tx + delta(3, 1, 1)) / (2 * w1 + Omega)));

F2 = 0;

for l = 1:nWaves
    F2 = F2 + ...
        T(5, 1, 1) * (sin(2 * l * Omega * tx + delta(5, 1, 1)) / (2 * l *
Omega) - ...
        sin(((2 * l - 2) * Omega + 2 * w1) * tx + delta(5, 1, 1)) / ((2 *
l - 2) * Omega + 2 * w1)) - ...
        T(4, 1, 1) * sin(2 * l * Omega * tx + delta(4, 1, 1)) / (2 * l *
Omega) - ...
        T(5, 1, 1) * sin((2 * l * Omega + 2 * w1) * tx + delta(5, 1, 1))
/ (2 * l * Omega + 2 * w1);

    if (l * Omega - w1) ~= 0
        F2 = F2 + T(4, 1, 1) * sin((2 * l * Omega - 2 * w1) * tx +
delta(4, 1, 1)) / (2 * l * Omega - 2 * w1);
    end

    if l ~= 1
        F2 = F2 - T(4, 1, 1) * sin((2 * l - 2) * Omega * tx + delta(4, 1,
1)) / ((2 * l - 2) * Omega);
        F2 = F2 + T(5, 1, 1) * sin((2 * l - 2) * Omega * tx + delta(5, 1,
1)) / ((2 * l - 2) * Omega);
    end

    if ((l - 1) * Omega - w1) ~= 0
        F2 = F2 + T(4, 1, 1) * sin(((2 * l - 2) * Omega - 2 * w1) * tx +
delta(4, 1, 1)) / ((2 * l - 2) * Omega - 2 * w1);
    end
end

F = F1 + (Um1 * Um2 * F2) / (4 * pi);

switch k
    case 1
        P1 = P1 + F;

    case 2
        P1 = P1 - F;
end

```

```

end

for k = 1:2
    switch k
        case 1
            tx = Tx / 2;

        case 2
            tx = 0;
    end

    F1 = (Um1 * Um2 / 2) * (T(1, 2, 1) * (cos(Omega * tx - delta(1, 2, 1)) /
Omega - cos((2 * w1 - Omega) * tx + delta(1, 2, 1)) / (2 * w1 - Omega)) - ...
        T(2, 2, 1) * (cos(Omega * tx + delta(2, 2, 1)) / Omega + cos((2 * w1
+ Omega) * tx + delta(2, 2, 1)) / (2 * w1 + Omega))) + ...
        (Um2 ^ 2 / 2) * (T(3, 2, 1) * (sin(delta(3, 2, 1)) * tx - cos(2 * w1
* tx + delta(3, 2, 1)) / (2 * w1)));

    F2 = 0;

    for l = 1:nWaves
        F2 = F2 + ...
            T(4, 2, 1) * (cos(((2 * l - 1) * Omega - 2 * w1) * tx + delta(4,
2, 1)) / ((2 * l - 1) * Omega - 2 * w1) + ...
                cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(4, 2, 1))) / ((2 * l - 1) *
Omega) + ...
            T(5, 2, 1) * (cos((2 * l - 1) * Omega * tx + delta(5, 2, 1)) /
((2 * l - 1) * Omega) + ...
                cos(((2 * l - 1) * Omega + 2 * w1) * tx + delta(5, 2, 1)) / ((2 *
l - 1) * Omega + 2 * w1));
    end

    F = F1 - (Um2 ^ 2 * F2) / (2 * pi);

    switch k
        case 1
            P1 = P1 + F;

        case 2
            P1 = P1 - F;
    end
end

P1 = P1 / Tx;

for k = 1:Steps
    Mem(k) = N(1, 1, 1) * sin(Omega * t(k) + fi(1, 1));

    for l = 1:nWaves
        Mem(k) = Mem(k) + N(2, 1, 1) * sin(2 * l * Omega * t(k) + fi(2, 1)) +
N(3, 1, 1) * sin((2 * l - 2) * Omega * t(k) + fi(3, 1));
    end
end

wm = zeros(1, nWaves);
wm(1, 1) = XI(1, 1) * Omega;

for k = 1:nWaves
    wm(2, k) = XI(2, k) * (2 * k - 1) * Omega;
    wm(3, k) = 2 * XI(3, k) * k * Omega;
end

```

```

for k = 1:Steps
    w(k) = wm(1, 1) * cos(Omega * t(k) + alpha(1, 1));

    for l = 1:nWaves
        w(k) = w(k) + wm(2, l) * cos(2 * l * Omega * t(k) + alpha(2, l)) +
wm(3, l) * cos((2 * l - 2) * Omega * t(k) + alpha(3, l));
    end
end

S2d = Mem .* w;

plot(t, S2d, 'LineWidth', 2);
grid();
legend('S2(t)');

S2p = 0;

for k = 1:Sx
    S2p = S2p + abs(S2d(k) * Step);
end

S2p = S2p / Tx;
P2 = (1 / 2) * N(1, 1, 1) * wm(1, 1) * sin(fi(1, 1) - alpha(1, 1));

for k = 1:nWaves - 1
    P2 = P2 + (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * sin(fi(2, k) - alpha(2, k))
+ N(3, 1, k) * wm(3, k) * sin(fi(3, k) - alpha(3, k)) + ...
    N(2, 1, k + 1) * wm(3, k) * sin(fi(2, k + 1) - alpha(3, k)) + N(3, 1,
k) * wm(2, k + 1) * sin(fi(3, k) - alpha(2, k + 1)));
end

k = nWaves;
P2 = P2 + (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * sin(fi(2, k) - alpha(2, k)) +
N(3, 1, k) * wm(3, k) * sin(fi(3, k) - alpha(3, k)));

Q2 = -(1 / 2) * N(1, 1, 1) * wm(1, 1) * cos(fi(1, 1) - alpha(1, 1));

for k = 1:nWaves - 1
    Q2 = Q2 - (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * cos(fi(2, k) - alpha(2, k))
+ N(3, 1, k) * wm(3, k) * cos(fi(3, k) - alpha(3, k)) + ...
    N(2, 1, k + 1) * wm(3, k) * cos(fi(2, k + 1) - alpha(3, k)) + N(3, 1,
k) * wm(2, k + 1) * cos(fi(3, k) - alpha(2, k + 1)));
end

k = nWaves;
Q2 = Q2 - (1 / 2) * (N(2, 1, k) * wm(2, k) * cos(fi(2, k) - alpha(2, k)) +
N(3, 1, k) * wm(3, k) * cos(fi(3, k) - alpha(3, k)));

S2 = sqrt(P2 ^ 2 + Q2 ^ 2);
eff = S2 / P1;

```