

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«Харьковский политехнический институт»

**Н. В. Анищенко**

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ БЫТОВОЙ ТЕХНИКИ**

Учебное пособие  
для студентов высших учебных заведений

Харьков  
Підручник НТУ «ХПІ»  
2015

УДК 621.313(075):681.3

ББК 31.26:32.973.2

A67

*Утверждено редакционно-издательским советом университета,  
протокол №2 от 25.06.2015 г.*

**Рецензенты:**

*Б. И. Кузнецов*, доктор технических наук, профессор, Институт технических проблем магнетизма НАН Украины;

*С. Г. Буряковский*, кандидат технических наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта;

*Л. В. Акимов*, доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «ХПИ».

**Анищенко Н. В.**

A67 Компьютерное моделирование электроприводов бытовой техники : уч. пособ. / Н. В. Анищенко. – Харьков : Підручник НТУ «ХПИ», 2015. – 95с.

**ISBN**

Дана общая характеристика двигателей электробытовой техники, рассмотрены общие принципы математического описания и приведены математические модели различных типов однофазных асинхронных двигателей, рассмотрен принцип работы и математические модели коллекторных двигателей постоянного и переменного тока, а также бесконтактных двигателей постоянного тока, приведены результаты компьютерного моделирования. Пособие предназначено для студентов специальности 7(8).05070206 «Электробытовая техника» базового направления 6.050702 «Электромеханика».

Дана загальна характеристика двигунів електро побутової техніки, розглянуті загальні принципи математичного опису та наведені математичні моделі різних типів однофазних асинхронних двигунів, розглянутий принцип роботи та математичні моделі колекторних двигунів постійного та змінного струму, а також безконтактних двигунів постійного струму, наведені результати комп'ютерного моделювання. Посібник призначений для студентів спеціальності 7(8).05070206 «Електро побутова техніка» базового напрямку 6.050702 «Електромеханіка».

Лл. 63. Табл. 7. Бібліогр. 16 назв.

**УДК 621.313(075):681.3**

**ББК 31.26:32.973.2**

© Н. В. Анищенко, 2015

© Підручник НТУ «ХПИ», 2015

**ISBN**

## ВВЕДЕНИЕ

Значительное количество устройств и приборов бытовой техники являются электромеханическими. В них, в основном, используются электрические двигатели мощностью до 750 Вт. Такие двигатели принято называть микромашинами. Возможность работы микромашин в сетях однофазного тока широко используется на практике.

Электрические микромашины по сравнению с двигателями средней и большой мощности характеризуются:

- очень широким диапазоном угловой скорости вращения (от одного оборота в сутки до нескольких десятков тысяч оборотов в минуту);
- иным соотношением активных и индуктивных сопротивлений обмоток (часто  $R > X$ );
- относительно большим значением тока холостого хода (до  $90\%I_n$ );
- незначительным насыщением магнитной цепи;
- значительно меньшими потерями в стали по сравнению с потерями в обмотках;
- малым числом пазов и, следовательно, плохим гармоническим составом магнитного поля в зазоре;
- большой плотностью тока в обмотках;
- низкими энергетическими показателями.

В зависимости от назначения все электрические микромашины можно разделить на две большие группы:

- микромашины общепромышленного применения;
- микромашины автоматических устройств.

Основным потребителем микромашин общепромышленного применения являются устройства и приборы электробытовой техники.

Наиболее характерной чертой микромашин переменного тока является то, что это несимметричные двухфазные или однофазные машины.

Для исследования несимметричных электрических машин применяются методы неподвижных координат, симметричных составляющих и вращающихся полей. Использование методик компьютерного моделирования значительно облегчает исследование свойств несимметричных машин, обеспечивая хорошее качество результатов. В учебном пособии компьютерное моделирование проводилось в среде MATLAB-Simulink с использованием пакета расширения Sim Power System.

В первом разделе дана общая характеристика и краткая классификация электродвигателей бытовой техники.

Во втором разделе рассмотрены наиболее распространенные в бытовой технике асинхронные микродвигатели. Дана классификация асинхронных двигателей. Рассмотрены общие принципы математического описания однофазных асинхронных двигателей, приведена обобщенная математическая модель. На основании обобщенной модели составлены модели конденсаторного асинхронного двигателя, двигателя с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки и трехфазного асинхронного двигателя при включении в однофазную сеть. Для всех моделей выполнено компьютерное моделирование и приведены графики.

В третьем разделе рассмотрен принцип работы коллекторных микродвигателей постоянного и переменного тока, приведены математические модели и результаты компьютерного моделирования.

Принцип работы бесконтактных двигателей постоянного тока рассмотрен в четвертом разделе. Приведены математические модели и графики переходных процессов.

Автор выражает искреннюю благодарность Л. В. Акимову за ценные советы при подготовке учебного пособия.

## *Раздел 1*

### **Общая характеристика электродвигателей бытовой техники**

Электродвигатели являются одним из основных элементов конструкции электромеханических бытовых приборов и во многом определяют их надежность и эксплуатационные характеристики. Электродвигатели классифицируют по роду питающего напряжения, конструктивному исполнению, принципу действия, способу возбуждения, числу фаз питающей сети, наличию коллекторно-щеточного узла и другим признакам.

По роду питающего напряжения электродвигатели делят на двигатели переменного, постоянного тока и универсальные.

Электродвигатели переменного тока предназначены для работы только от источника переменного тока. По принципу действия они делятся на асинхронные (АД) и синхронные (СД) двигатели, а по числу фаз питающей сети – на однофазные и многофазные. В асинхронных электродвигателях скорость вращения ротора зависит от нагрузки на валу. Наиболее распространены асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Трехфазные асинхронные двигатели применяются в коммунальных стиральных автоматах и насосах.

В бытовых приборах наиболее распространены однофазные электродвигатели, так как сеть переменного тока в квартирах представляет собой однофазный источник питания. Иногда экономически более целесообразно при разработке новых бытовых приборов применять трехфазные электродвигатели. Включаемые по специальным схемам, такие двигатели работают от однофазного источника питания.

Однофазные асинхронные электродвигатели (ОАД) с короткозамкнутым ротором, применяемые в бытовых приборах, можно классифицировать следующим образом:

- по числу фаз обмотки статора – двигатели с однофазной, двухфазной и трехфазной обмоткой;
- по способу соединения фаз – двигатели с последовательным, параллельным и последовательно-параллельным соединением обмоток;

- по способу создания начального вращающего момента – двигатели с пусковым конденсатором, с рабочим конденсатором, с пусковым и рабочим конденсаторами, с пусковой обмоткой, с расщепленными полюсами, с асимметричным магнитопроводом и др.

АД с короткозамкнутым ротором надёжны в эксплуатации и имеют невысокую стоимость. Однако скорость их вращения при частоте источника питания 50 Гц теоретически не может превышать 3000 об/мин. Поэтому их применяют в бытовых приборах, необходимая скорость вращения рабочих органов которых не превышает указанного значения (холодильники, стиральные машины, воздухоочистители, увлажнители воздуха и др.).

Коллекторные двигатели переменного тока в отличие от асинхронных могут иметь скорость вращения более 3000 об/мин. Их целесообразно использовать в бытовых приборах, для которых по условиям технологического процесса необходима высокая скорость вращения рабочего органа при питании от сети переменного тока (пылесосы, полотеры, миксеры, смесители, кофемолки, щетки для чистки одежды и обуви и др.).

В синхронных электродвигателях скорость вращения ротора не зависит от нагрузки, поэтому их применяют в устройствах, рабочий орган которых должен вращаться с постоянной скоростью (часовые механизмы, командные устройства). При этом рабочий орган приводится во вращение от электродвигателя через редуктор. Иногда применение СД позволяет упростить конструкцию прибора и уменьшить его стоимость (электробритвы вибрационного типа, приборы для массажа и др.). В зависимости от способа возбуждения и конструктивных особенностей СД бывают с электромагнитным возбуждением, с возбуждением от постоянных магнитов, реактивные, редукторные, импульсные и др.

Электродвигатели постоянного тока предназначены для работы только от источника постоянного тока (сеть постоянного тока, аккумуляторная батарея). Они имеют хорошие регулировочные свойства и широкий диапазон скоростей вращения (от 3000 до 20000 об/мин). Двигатели постоянного тока (ДПТ) применяют в приборах, предназначенных для работы от автономного источника питания (детские игрушки, автомобильные пылесосы). Иногда ДПТ используют в бытовых приборах, предназначенных для работы от сети переменного тока (некоторые модели автоматических стиральных машин). Питание электродвигателя в таких случаях производят при помощи преобразователя.

По конструктивному исполнению двигатели постоянного тока подразделяют на коллекторные и бесконтактные (бесколлекторные).

Коллекторные ДПТ бывают с возбуждением от постоянных магнитов и с электромагнитным возбуждением. Двигатели с электромагнитным возбуждением по способу включения обмотки возбуждения подразделяют на двигатели с независимым, параллельным, последовательным возбуждением. Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ) не имеют коллекторно-щеточного узла и не являются источником радиопомех.

Универсальные электродвигатели могут работать как от источника постоянного тока, так и от источника переменного тока. Такие электродвигатели применяют в приборах, для которых по условиям эксплуатации возможен переход от источника постоянного тока к источнику переменного тока, и наоборот (электрические бритвы).

От правильного выбора электродвигателя во многом зависит надежность и экономичность работы прибора. При выборе типа привода необходимо учитывать большое количество факторов, зависящих от выполняемых функций. Основными показателями двигателя являются пусковой, максимальный и минимальный вращающий моменты, скорость вращения, виброакустические показатели. Для ряда приборов (звуко- и видеозапись) важными являются специфические показатели двигателя: уровень магнитных наводок, жесткость механической характеристики.

Во всех случаях, если позволяют функциональные характеристики прибора, рекомендуется применять наиболее простые и дешевые асинхронные двигатели. Синхронные и бесконтактные двигатели целесообразно применять в исключительных случаях, когда требуется стабильная скорость вращения. Коллекторные двигатели повышенной скорости вращения применяются в тех случаях, когда первостепенное значение имеют массогабаритные размеры прибора.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите наиболее распространенные микродвигатели переменного тока.
2. Назовите основное преимущество коллекторных двигателей переменного тока.
3. Назовите основное преимущество бесконтактных двигателей постоянного тока?

## *Раздел 2*

### **Асинхронные микродвигатели**

#### **2.1. Классификация и область применения**

Асинхронные однофазные микродвигатели наиболее распространены в бытовой технике. В зависимости от числа фаз обмотки статора  $m$  и характера пусковых элементов они подразделяются на следующие типы:

1. Трехфазные двигатели ( $m=3$ ).
2. Конденсаторные двигатели ( $m=2$ ):
  - с постоянно включенной емкостью;
  - с постоянно включенной и пусковой емкостями.
3. Однофазные двигатели с пусковыми элементами во вспомогательной фазе ( $m=1$ ):
  - с пусковым сопротивлением (внесенным или внешним). Двигатели с сопротивлением, внесенным во вспомогательную обмотку, называются также машинами с повышенным сопротивлением пусковой фазы;
  - с пусковой емкостью.

Все типы двигателей могут быть одно- и многоскоростными.

Рассмотрим подробнее классификацию АД общего назначения по конструктивным признакам. Трехфазные и однофазные (конденсаторные и с пусковыми элементами) двигатели выполняются с трехфазными и двухфазными распределенными обмотками, а в случае явнополюсной конструкции статора – с сосредоточенной обмоткой на полюсах. Трехфазные двигатели могут быть универсальными, т. е. работать от трехфазной и от однофазной сети при включении фазосдвигающих элементов. Конденсаторные асинхронные двигатели (КАД) выполняются с двухфазными распределенными обмотками, соединяемыми параллельно или последовательно, или трехфазными обмотками. Для двухфазных АД наиболее распространена параллельная схема включения обмоток статора. Схемы включения различных видов двухфазных АД приведены на рис. 2.1.

При невысоких требованиях к пусковому моменту применяют КАД с рабочим конденсатором  $C_p$  (рис. 2.1, *a*), а при повышенных требованиях – КАД с рабочим и пусковым конденсаторами (рис. 2.1, *б*), у которых пусковой конденсатор  $C_{п}$ , включают параллельно рабочему конденсатору  $C_p$  на период пуска.

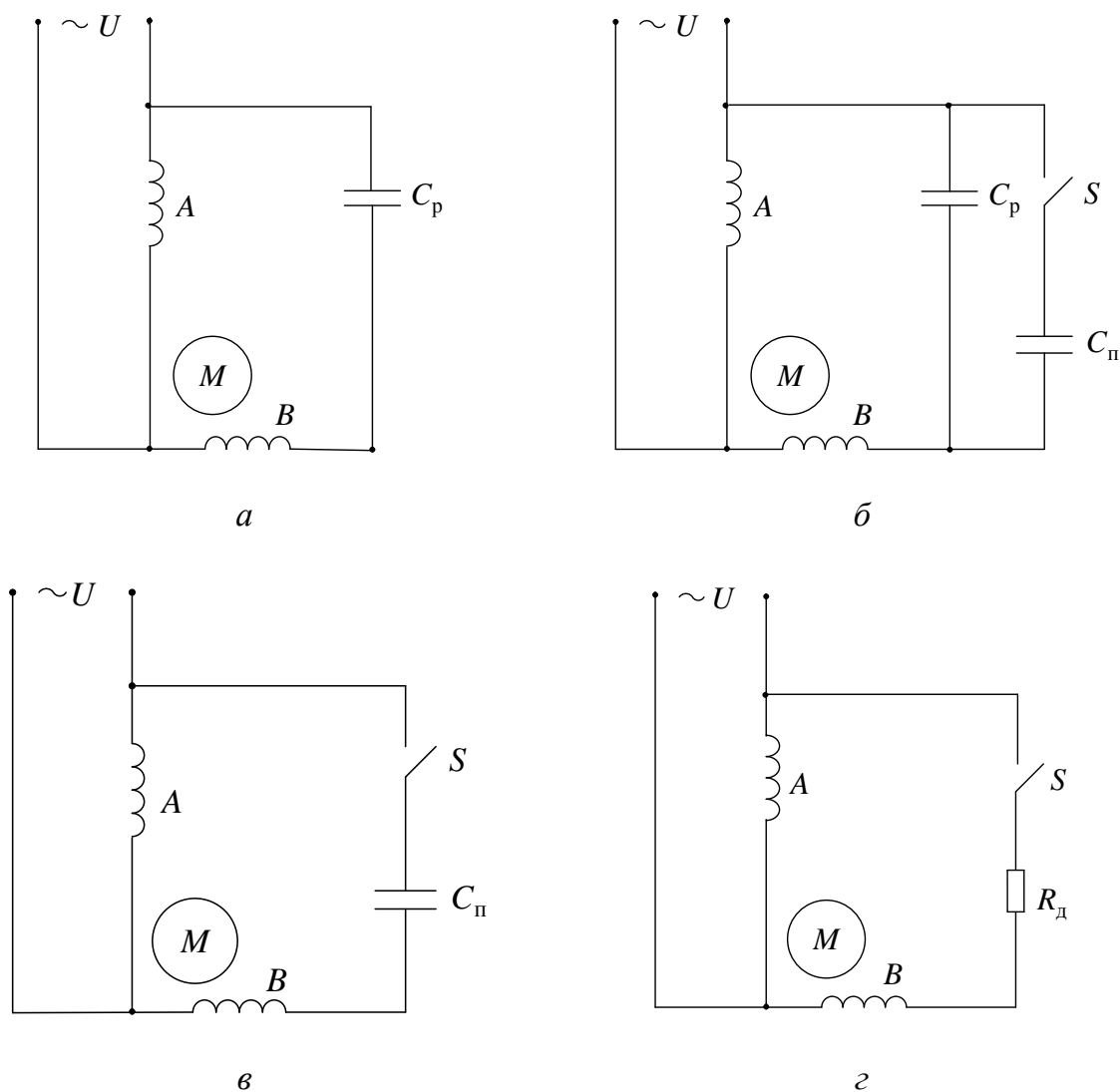


Рисунок 2.1 – Схемы включения двухфазных асинхронных двигателей:  
*a* – с рабочей емкостью; *б* – с рабочей и пусковой емкостью;  
*в* – с пусковой емкостью; *г* – с пусковым сопротивлением

В ОАД с пусковыми элементами используют двухфазную обмотку статора с параллельным включением рабочей *A* и пусковой *B* фаз. Фаза *B*

включается только на период пуска. Она может иметь пусковой конденсатор (рис. 2.1, в) либо повышенное активное сопротивление (рис. 2.1, з), обеспечиваемое малым сечением провода обмотки или применением бифилярной обмотки. В однофазных двигателях без пусковой фазы обмотка распределена в пазах примерно на  $2/3$  окружности. У этих двигателей на время пуска часть обмотки шунтируется конденсатором.

Стремление упростить технологию изготовления асинхронных двигателей привело к появлению явнополусной конструкции с сосредоточенной обмоткой статора. Явнополусные двигатели выполняются с экранированными полюсами или с асимметричным статором (реже с неравномерным воздушным зазором под полюсами) и конденсаторными с двухфазной обмоткой на полюсах. Однако явнополусные двигатели имеют большие габариты и массу, меньший КПД, а также пусковой и максимальный моменты по сравнению с КАД с распределенной обмоткой. Их применяют главным образом при малых мощностях электропривода (примерно  $P_n \leq 25$  Вт).

Большинство АД имеют распределенную обмотку статора и короткозамкнутую обмотку ротора в виде «беличьей клетки». Иногда применяют ферромагнитный ротор (сплошной или полый). Использование различных роторов позволяет изменить форму механической характеристики  $M = f(s)$  двигателя.

Промышленностью выпускается большое количество типов асинхронных двигателей малой мощности. Наиболее массовыми являются двигатели с распределенной обмоткой на статоре: трехфазные, конденсаторные, однофазные с пусковыми элементами.

Кроме бытовых асинхронных двигателей выпускаются единые серии асинхронных двигателей малой мощности общего применения, которые помимо трехфазного исполнения имеют и однофазные модификации: конденсаторные двигатели с трехфазными и двухфазными обмотками, однофазные двигатели с пусковыми элементами – с повышенным активным сопротивлением в пусковой фазе и с пусковой емкостью.

Следует отметить, что все однофазные двигатели с пусковыми элементами должны иметь специальные пусковые устройства. Пусковое устройство включает на период пуска вспомогательную (пусковую) фазу и пусковой элемент (активное сопротивление или емкость). В качестве пус-

кового устройства могут использоваться центробежный выключатель, пусковое токовое реле и др. После достижения определенной скорости (0,75–0,8 синхронной скорости вращения) пусковая фаза отключается, и двигатель работает только с одной рабочей фазой, которая чаще всего создает при этих скоростях момент, больший, чем при включении обеих фаз.

Выбор типа двигателя определяется его рабочими, пусковыми и регулировочными свойствами. В зависимости от условий пуска однофазные двигатели могут быть условно разделены на три группы:

а) для легких условий пуска, когда пусковой момент  $M_n \leq 0,5 \cdot M_n$  (с короткозамкнутым витком на полюсе, конденсаторные двигатели с постоянно включенной емкостью (рис. 2.1, а);

б) для нормальных условий пуска:  $M_n = (1 \div 1,2)M_n$  (однофазные с пусковым сопротивлением (рис. 2.1, з), конденсаторные с постоянно включенной и пусковой емкостью (рис. 2.1, б), конденсаторные с постоянно включенной емкостью (рис. 2.1, а);

в) для тяжелых условий пуска:  $M_n = (1,5 \div 3,5)M_n$  (однофазные двигатели с пусковой емкостью (рис. 2.1, в).

Повышение пускового момента у двигателей с постоянно включенной емкостью достигается подбором емкости, обеспечивающей заданный пусковой момент за счет некоторого ухудшения рабочих свойств.

В ряде случаев у конденсаторных двигателей с постоянно включенной емкостью в конденсаторную фазу включают активное сопротивление для обеспечения равномерности хода двигателя и уменьшения вибраций, при этом кратность пускового момента повышается до значения  $k_n = 1,2$ . Кратность пускового момента однофазных двигателей с пусковым сопротивлением иногда доходит до  $k_n = 2$ .

Основные области применения ОАД: компрессоры и насосы; аппараты магнитной записи (магнитофоны, видеомагнитофоны, диктофоны и др.); счетные и пишущие машины; кино- и диапроекторы; вентиляторы и увлажнители; фены и рукосушители; кондиционеры, стиральные и посудомоечные машины; холодильники, мясорубки, овощерезки и соковыжималки, мороженицы, мусородробилки, электроманикюрницы, машинки для стрижки овец и дойки коров, ножеточки и др.

## 2.2. Общие принципы математического описания однофазных асинхронных двигателей

Для исследования работы ОАД используются те же методы, которые применяются для несимметричных асинхронных двигателей:

- метод неподвижных в пространстве координат (метод продольного и поперечного полей, метод двух реакций);
- метод двух вращающихся в противоположные стороны полей;
- метод симметричных составляющих.

При использовании этих методов делаются допущения, которые позволяют линеаризовать электрические цепи ОАД и тем самым предполагать справедливым использование метода наложения:

- в машине отсутствует насыщение, т. е. ее параметры неизменны;
- статор и ротор машины гладкие, воздушный зазор равномерен;
- напряжение, приложенное к двигателю, ЭДС и токи машины меняются по синусоидальному закону.

*Метод продольного и поперечного полей*, который иногда называют *методом двух реакций*, заключается в том, что каждую из величин многофазной системы, пульсирующих с частотой сети и представляющих собой некоторый пространственный вектор, раскладывают на две составляющие по двум взаимно перпендикулярным осям ( $\alpha$  и  $\beta$ ,  $d$  и  $q$ ,  $x$  и  $y$ ). При расчете рассматривается взаимодействие МДС и магнитных потоков отдельно по каждой оси. В результате вместо многофазной системы получают две системы уравнений. Метод позволяет преобразовать системы уравнений с периодическими коэффициентами в систему дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами. Для исследования конденсаторных ОАД этим методом пригодна любая ортогональная система двух координатных осей, вращающихся в пространстве с произвольной скоростью.

С точки зрения рассмотрения как установившихся, так и переходных процессов метод двух реакций является наиболее универсальным. Однако он содержит погрешность, обусловленную предположением синусоидального распределения МДС в пространстве, хотя в действительности МДС не синусоидальны. Однако данный метод удобен при математическом моделировании и исследовании переходных процессов ОАД на ЭВМ.

*Метод двух вращающихся в противоположные стороны полей* заключается в следующем. Независимо от числа обмоток, типа и режима работы асинхронной машины с синусоидальным изменением магнитной индукции, ее магнитное поле в воздушном зазоре можно рассматривать состоящим из прямого и обратного поля с половинными значениями амплитуды. При взаимодействии прямого и обратного бегущих полей с токами соответствующих обмоток фаз возникают два вращающихся момента, направленных в противоположные стороны. Результирующий момент определяется алгебраической разностью этих моментов.

Метод двух вращающихся в противоположные стороны полей наиболее нагляден с точки зрения уяснения физической картины явлений в машине и учета высших гармоник. Существует несколько разновидностей этого метода. Применительно к ОАД наилучшие результаты дает использование временной комплексной плоскости. При этом векторы представляются в виде комплексных величин, что дает возможность объединить пространственные и временные углы. В качестве недостатка отметим значительную сложность и громоздкость получаемых математических выражений.

*Метод симметричных составляющих* основан на разложении несимметричных электрических систем двигателя на симметричные системы, каждая из которых создает свое круговое вращающееся поле, воздействуя на ротор машины. Одна из этих систем (система прямой последовательности) будет создавать двигательный режим, вторая (система обратной последовательности) – тормозной, а третья (система нулевой последовательности) в зависимости от конструкции машины и значения скорости – двигательный или тормозной режим. Результирующий момент на валу двигателя определяется алгебраической суммой моментов отдельных составляющих.

Метод симметричных составляющих получил большое распространение в практике проектирования и исследования ОАД. Это объясняется тем, что метод симметричных составляющих позволяет: сравнительно легко определить параметры схем замещения двигателя; получить простые математические выражения рабочих, регулировочных и механических характеристик машины; произвести анализ и проследить влияние того или иного параметра на показатели и характеристики ОАД; учесть влияние высших гармонических на количественные показатели машины.

При одинаковых исходных условиях эти три метода расчета ОАД являются эквивалентными и, несмотря на различные формы записи уравнений и значения параметров машины, приводят к одним и тем же окончательным результатам.

В дальнейшем для математического описания однофазного асинхронного двигателя был использован метод двух реакций, поскольку он наиболее удобен для компьютерного моделирования и позволяет выразить параметры статорной цепи через постоянные коэффициенты.

### **2.3. Системы координат, применяемые при исследованиях асинхронных машин, и особенности задания питающих напряжений**

Уравнения электрической машины могут быть записаны в различных системах координатных осей. Считается, что в электромеханике существует бесчисленное число систем координат, однако на практике находят применение только наиболее удобные. В зависимости от принятой системы координат разработаны следующие модели АД:

- модели АД в трехфазной системе координат;
- модели АД в двухфазных ортогональных системах координат;
- однофазные модели на основании статических характеристик АД с упрощенным учетом электромагнитных процессов (на основании схемы замещения АД в установившемся режиме).

Современный уровень развития вычислительной техники дает принципиальную возможность с учетом сделанных допущений строить модель асинхронного двигателя в трехфазных осях  $[A, B, C]$ . Однако, структурная схема модели при этом получается весьма сложной из-за наличия переменных коэффициентов в уравнениях связи фазных токов и потокосцеплений машины, зависящих от мгновенного угла поворота ротора.

Для исключения части коэффициентов взаимной индукции в уравнениях потокосцеплений, которые периодически изменяются, используется замена реальных фазных значений проекциями обобщенных векторов на оси координатной системы, которая наиболее удобна для исследований.

Достижение поставленной цели возможно только в том случае, если новая система координат неподвижна относительно цепей, обладающих электрической или магнитной несимметрией. Преобразование координат позволяет получить в дифференциальных уравнениях постоянные коэффициенты перед переменными, но не уменьшает число уравнений системы. Дифференциальные уравнения, описывающие работу электрической машины, имеют постоянные коэффициенты только в том случае, когда оси обмоток статора и ротора неподвижны друг относительно друга.

В теории электромагнитных переходных процессов электрических машин в ортогональных осях применяются обычно три координатные системы, являющиеся частным случаем координатной системы, вращающейся с произвольной скоростью  $\omega_k$ :

- система координат  $[\alpha, \beta]$ , неподвижная относительно статора  $\omega_k = 0$ ;
- система координат  $[d, q]$ , неподвижная относительно ротора и вращающаяся относительно статора с частотой вращения ротора  $\omega_k = \omega_r$ ;
- система координат  $[x, y]$ , вращающаяся относительно статора с синхронной скоростью и являющаяся неподвижной относительно поля статора асинхронной машины, в этом случае  $\omega_k = \omega_0$ .

**Система координат  $[\alpha, \beta]$**  применяется для анализа систем электропривода с управлением двигательными и тормозными режимами по цепи статора, в том числе и при анализе систем с векторным управлением и для исследования режимов асинхронных машин при несимметрии статорных цепей. При моделировании АД с питанием от источников несинусоидального напряжения используются модели в естественных осях и модели  $[\alpha, \beta]$ . Обычно положение оси  $\alpha$  совпадает с магнитной осью одной из фаз реальной машины, при этом эквивалентный ток  $i_{s\alpha}$  будет равен реальному фазному току двигателя. Определенную сложность при построении модели асинхронного двигателя в системе координат  $[\alpha, \beta]$  представляет то обстоятельство, что эквивалентные напряжения  $U_{s\alpha}$  и  $U_{s\beta}$  изменяются во времени по синусоидальному закону с постоянной частотой источника электроэнергии  $f_c$ :

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_c}{Z_p} = \text{const}, \quad (2.1)$$

где  $Z_p$  – число пар полюсов машины.

Запишем эти напряжения:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = U_m \cos \omega_0 t; \\ U_{s\beta} = U_m \sin \omega_0 t. \end{cases} \quad (2.2)$$

**Систему координат**  $[d, q]$  используют преимущественно для исследования режимов СД и АД при несимметрии ротора. Она наиболее целесообразна при расчете систем электропривода с машинами двойного питания, например, каскадных схем управления асинхронным двигателем с фазным ротором. При этом статорные и роторные переменные изменяются по синусоидальному закону с частотой скольжения двигателя.

Вектор напряжения статора  $\tilde{U}_s$  в системе координат, вращающейся со скоростью ротора, определяется как

$$\tilde{U}_{s(d,q)} = U_m e^{j\omega_0 t} e^{-j\omega_r t}, \quad (2.3)$$

а проекции вектора напряжения на координатные оси  $d$  и  $q$  определяются выражениями:

$$\begin{cases} U_{sd} = U_m \cos(\omega_0 - \omega_r)t; \\ U_{sq} = U_m \sin(\omega_0 - \omega_r)t. \end{cases} \quad (2.4)$$

**Третью систему координат**  $[x, y]$  целесообразно использовать только для исследования симметричных режимов асинхронных машин, если ее применение приводит к упрощению описаний возмущающих воздействий. Обобщенный вектор питающего двигателя напряжения в системе координат  $[x, y]$ , вращающейся со скоростью  $\omega_k = \omega_0$ , преобразуется к виду:

$$\tilde{U}_s = U_m. \quad (2.5)$$

Следовательно,

$$\begin{cases} U_{sx} = U_m; \\ U_{sy} = 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

Аналогично остальные статорные и роторные переменные в системе координат  $[x, y]$  представлены их амплитудными значениями и не содержат гармонических составляющих.

Модели  $[x, y]$ , также как и  $[d, q]$ , привязаны к скорости поля статора (или ротора), что ограничивает область их применения только случаями питания статора АД синусоидальным напряжением. В противном случае требуется разложение несинусоидального напряжения на сумму гармонических составляющих. Это увеличивает время моделирования и усложняет модель при анализе переходных процессов, когда на каждом шаге расчета необходимо выполнять разложение на гармонические составляющие. Момент на валу АД определяется как сумма моментов от каждой гармоники напряжения питания, что усложняет расчет.

Система  $[x, y]$  применяется для моделирования асинхронных машин со скалярным частотно-токовым и векторным управлением. При построении таких систем регулирования асинхронным электроприводом эта система координат наиболее целесообразна, поскольку в ней амплитуда и частота входного напряжения, приложенного к статорным обмоткам, присутствует в явном виде. Вычислительные операции для определения ненаблюдаемых координат двигателя при этом существенно упрощены из-за отсутствия в статорных и роторных цепях гармонических составляющих.

В работе исследование ОАД проводится в системе координат  $[\alpha, \beta]$ , поскольку она наиболее удобна для исследования режимов асинхронных машин при несимметрии статорных цепей.

## **2.4. Обобщенная математическая модель асинхронного двигателя**

Асинхронный двигатель представляет собой нелинейный многомерный объект с достаточно сложной структурой, который можно представить как совокупность сложных трехмерных электрических и магнитных цепей, содержащих участки с различными магнитными проницаемостями. Поэтому точное описание реальной машины с помощью уравнений Максвелла оказывается практически невозможным. При исследованиях и инженерных расчетах пользуются упрощенными представлениями о физических процессах в машине, приближенно учитывая, а в некоторых случаях вообще не рассматривая:

- влияние меняющегося насыщения магнитной цепи;
- эффект вытеснения тока в меди обмоток;
- потери в стали магнитопровода;
- вихревые токи;
- эффект гистерезиса;
- влияние формы пазов и неравномерность воздушного зазора;
- неоднородное распределение в пространстве кривых МДС и индукции, наличие высших гармоник в воздушном зазоре;
- нагрев обмоток;
- другие факторы (например, не учитывается емкость внутри обмоток).

Уравнения, записанные с такими допущениями, являются лишь приближенной математической моделью реальной машины. Однако во многих случаях они описывают явления в машине и ее поведение с вполне достаточной для практических целей точностью.

При составлении уравнений обычно учитывают только первую гармоническую коэффициентов индуктивностей обмоток. Также для исключения периодически меняющейся части коэффициентов применяется замена реальных фазных значений проекциями обобщенных векторов на оси координатной системы, наиболее удобной для исследования.

Основой математического описания асинхронной машины являются дифференциальные уравнения электрического ( $2^{\text{й}}$  закон Кирхгофа) и механического (уравнение движения ротора) равновесия системы, а также уравнения преобразования электромагнитной энергии в механическую. Такая система уравнений носит название уравнения Парка-Горева.

В наиболее общей форме в системе координат, вращающейся с некоторой произвольной скоростью  $\omega_k$ , эти уравнения имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{u}_s = r_s \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s; \\ \tilde{u}_r = r_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r; \\ M = \frac{K_\phi}{2} \cdot Z_p \cdot \text{Im}[\tilde{\Psi}_s^* \times \tilde{i}_s]; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c; \\ \tilde{\Psi}_s = L_s \tilde{i}_s + L_m \tilde{i}_r; \\ \tilde{\Psi}_r = L_m \tilde{i}_s + L_r \tilde{i}_r, \end{array} \right. \quad (2.7)$$

где  $\tilde{i}, \tilde{\Psi}, \tilde{u}$  – мгновенные значения обобщенных пространственных векторов токов, потокосцеплений и напряжений, полученные из мгновенных значений соответствующих фазных величин;

$r_s, r_r$  – активные сопротивления фазы статора и ротора;

$L_s, L_r$  – индуктивности обмоток статора и ротора;

$L_m$  – взаимная индуктивность между статорными и роторными обмотками;

$\omega$  – угловая скорость вращения ротора;

$\omega_r = Z_p \omega$  – угловая электрическая частота вращения ротора;

$K_\phi$  – коэффициент, зависящий от количества фаз статора;

$J$  – приведенный момент инерции электромеханической системы;

$M_c$  – момент сил сопротивления, приведенный к валу машины.

Если пренебречь насыщением магнитопровода АД, то магнитные потоки, сцепляющиеся с его обмотками, будут пропорциональны соответствующим МДС. Рассмотрим основные соотношения между этими величинами. Допустим, что параметры обмотки ротора приведены к обмотке статора и рабочий зазор машины равномерный.

С обмоткой фазы А статора сцепляются магнитные потоки, создаваемые как ею самой, так и всеми остальными обмотками. Часть магнитного потока, создаваемого обмоткой, сцепляется только с её собственными витками. Эта часть называется потоком рассеяния. Другая часть, помимо собственных витков охватывает также витки других обмоток. Она называется

главным или основным магнитным потоком. Индуктивность  $L_{s\sigma}$ , связывающая поток рассеяния обмотки с протекающим в ней током, называется индуктивностью рассеяния, а индуктивность  $L_m$ , определяющая потокосцепление с основным потоком – взаимной индуктивностью или индуктивностью основного потока. При отсутствии токов в обмотках ротора можно представить потокосцепление фазы  $A$  в виде:

$$\begin{cases} \Psi_{ssa} = L_{s\sigma} i_{sa} + l_m i_{sa} + M_{ab} i_{sb} + M_{ac} i_{sc}; \\ \Psi_{ss\alpha} = L_{s\sigma} i_{s\alpha} + l_m i_{s\alpha} + M_{\alpha\beta} i_{s\beta} \end{cases}, \quad (2.8)$$

где  $l_m$  – индуктивность основного потока статорных обмоток при отсутствии токов в других обмотках;  $M_{ab}$ ,  $M_{ac}$ ,  $M_{\alpha\beta}$  – взаимные индуктивности статорных обмоток.  $M_{\alpha\beta} = 0$ .

При условии равенства токов и совпадения расположения осей двух обмоток в пространстве, магнитный поток, создаваемый током второй обмотки и сцепляющийся с витками первой, будет полностью идентичен потоку, создаваемому первой обмоткой и сцепляющимся с витками второй. Очевидно, что тогда индуктивность основного потока статорных обмоток  $l_m$  будет равна их взаимной индуктивности при условии совмещения геометрических осей.

Индуктивность  $L_s = L_{s\sigma} + L_m$  соответствует полной индуктивности статорной обмотки, включающей ее индуктивность от потока рассеяния  $L_{s\sigma}$ , индуктивность от части основного магнитного потока, созданного самой обмоткой  $l_m$ , и индуктивность от части основного потока, созданной другими обмотками статора. Для трёхфазной машины, полная индуктивность обмотки статора от основного магнитного потока  $L_m$  в  $3/2$  раза больше ее индуктивности  $l_m$ , рассчитанной при отсутствии токов в других обмотках.

Для других обмоток можно записать аналогичные выражения, а затем объединить фазные проекции в обобщённый вектор потокосцепления статора при отсутствии токов ротора

$$\begin{cases} \Psi_{ss} = \frac{2 \cdot L_s}{3} (i_{sa} + i_{sb} e^{j120^\circ} + i_{sc} e^{j240^\circ}) = L_s i_s; \\ \Psi_{ss} = L_s (i_{s\alpha} + i_{s\beta} e^{j90^\circ}) = L_s i_s \end{cases}. \quad (2.9)$$

Наличие токов в обмотках ротора приведет к появлению дополнительных составляющих потокосцеплений обмоток статора. Если ось фазы ротора смещена в пространстве на некоторый угол  $\gamma$ , то взаимные индуктивности обмоток ротора и фазы статора можно определить через соответствующие углы, образуемые их осями:

$$\begin{cases} M_{aa} = M_{0a} \cos(\gamma) \\ M_{ba} = M_{0b} \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ M_{ca} = M_{0c} \cos(\gamma - 2\pi/3) \end{cases}, \quad (2.10)$$

$$\begin{cases} M_{\alpha\alpha} = M_{0\alpha} \cos(\gamma) \\ M_{\beta\alpha} = M_{0\beta} \cos(\gamma + \pi/2) \end{cases}$$

где  $M_{0a}$ ,  $M_{0b}$ ,  $M_{0c}$ ,  $M_{0\alpha}$ ,  $M_{0\beta}$  – взаимные индуктивности обмоток при  $\gamma = 0$ . Но взаимная индуктивность обмоток статора и ротора при нулевом смещении осей равна  $l_m$ . Так как параметры обмоток ротора приведены к статорным, можно считать, что при совпадении их осей картина магнитного поля будет такой же, как при совпадении осей статорных обмоток. Поэтому  $M_{0a} = M_{0b} = M_{0c} = M_{0\alpha} = M_{0\beta} = l_m$ .

Тогда полное потокосцепление обмотки фазы статора при наличии токов ротора будет:

$$\begin{cases} \Psi_{sra} = M_{aa}i_{ra} + M_{ba}i_{rb} + M_{ca}i_{rc} = L_m i_{ra} \cos(\gamma) \\ \Psi_{srb} = M_{ab}i_{ra} + M_{bb}i_{rb} + M_{cb}i_{rc} = L_m i_{rb} \cos(\gamma + 2\pi/3) \\ \Psi_{src} = M_{ac}i_{ra} + M_{bc}i_{rb} + M_{cc}i_{rc} = L_m i_{rc} \cos(\gamma - 2\pi/3) \end{cases}. \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} \Psi_{sra} = L_m i_{ra} \cos(\gamma) \\ \Psi_{srb} = L_m i_{rb} \cos(\gamma + \pi/2) \end{cases}$$

По этим проекциям аналогично можно построить вектор потокосцепления статора с ротором

$$\Psi_{sr} = \frac{2}{3} \left( \Psi_{sra} + \Psi_{srb} e^{j120^\circ} + \Psi_{src} e^{j240^\circ} \right) = L_m i_r e^{j\gamma} \quad (2.12)$$

$$\Psi_{sr} = \left( \Psi_{sra} + \Psi_{srb} e^{j90^\circ} \right) = L_m i_r e^{j\gamma}$$

и, суммируя с  $\Psi_{ss}$  из (2.9), получить общее потокосцепление статора, соответствующее режиму протекания токов в обмотках статора и ротора

$$\Psi_s = \Psi_{ss} + \Psi_{sr} = L_s i_s + L_m i_r e^{j\gamma}. \quad (2.13)$$

В силу симметрии связей между статором и ротором аналогичное выражение можно записать для потокосцепления ротора с учетом того, что для него угол  $\gamma$  будет отрицательным, т.к. по отношению к статору этот угол отсчитывается в отрицательном направлении

$$\Psi_r = \Psi_{sr} + \Psi_{rr} = L_m i_s e^{-j\gamma} + L_r i_r. \quad (2.14)$$

В выражениях (2.13) и (2.14) векторы тока статора и ротора записаны в различных системах координат. В первом выражении ток статора записан в неподвижной системе координат  $[\alpha, \beta]$ , связанной со статором, а ток ротора во вращающейся системе координат  $[d, q]$ , связанной с ротором. После подстановки индексов систем координат получим:

$$\begin{aligned} \Psi_s^{(\alpha\beta)} &= L_s i_s^{(\alpha\beta)} + L_m i_r^{(dq)} e^{j\gamma} = L_s i_s^{(\alpha\beta)} + L_m i_r^{(\alpha\beta)} \\ \Psi_r^{(dq)} &= L_m i_s^{(\alpha\beta)} e^{j\gamma} + L_r i_r^{(dq)} = L_m i_s^{(dq)} + L_r i_r^{(dq)}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Если обе части уравнения потокосцепления ротора умножить на оператор поворота  $e^{j\gamma}$ , то оно будет преобразовано в систему координат статора и примет вид:

$$\Psi_r^{(dq)} e^{j\gamma} = L_m i_s^{(dq)} e^{j\gamma} + L_r i_r^{(dq)} e^{j\gamma} = \Psi_r^{(\alpha\beta)} = L_m i_s^{(\alpha\beta)} + L_r i_r^{(\alpha\beta)}. \quad (2.16)$$

Таким образом, форма уравнений для обобщенных векторов потокосцеплений не зависит от выбора системы координат и индексы системы в них можно опустить. Тогда окончательно потокосцепления статора и ротора с учетом всех токов АД можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \Psi_s &= L_s i_s + L_m i_r = \Psi_{ss} + \Psi_{sr} \\ \Psi_r &= L_m i_s + L_r i_r = \Psi_{sr} + \Psi_{rr}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Из выражений (2.17) следует, что потокосцепления статора и ротора раскладываются на составляющие, обусловленные собственным током и током другой части АД.

Уравнения Кирхгофа для фазных напряжений статора АД имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d\tilde{\Psi}_{sa}}{dt} \\ u_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d\tilde{\Psi}_{sb}}{dt} \\ u_{sc} = r_s i_{sc} + \frac{d\tilde{\Psi}_{sc}}{dt} \end{array} \right. ; \quad \left\{ \begin{array}{l} u_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d\tilde{\Psi}_{s\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d\tilde{\Psi}_{s\beta}}{dt} \end{array} \right. . \quad (2.18)$$

Перейдя к векторной форме записи в системе координат  $[\alpha, \beta]$  получим уравнение в векторной форме:

$$\tilde{u}_s = r_s \tilde{i}_s + \frac{d\tilde{\Psi}_s}{dt} \quad (2.19)$$

Аналогично в системе координат  $[d, q]$ , вращающейся синхронно с ротором, можно получить:

$$\tilde{u}_r = r_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} \quad (2.20)$$

Уравнения (2.19) и (2.20) записаны в разных системах координат. Для перевода уравнения (2.20) в неподвижную систему координат умножим его на оператор поворота  $e^{j\varphi}$  и представим потокосцепление ротора как  $\psi_r^{(dq)} = \psi_r^{(\alpha\beta)} e^{-j\varphi}$

$$\tilde{u}_r^{(dq)} e^{j\varphi} = r_r \tilde{i}_r^{(dq)} e^{j\varphi} + e^{j\varphi} \frac{d(\tilde{\Psi}_r^{(\alpha\beta)} e^{-j\varphi})}{dt} . \quad (2.21)$$

Опуская после преобразований индексы системы координат, получим

$$\tilde{u}_r = r_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} - j \frac{d\varphi}{dt} \tilde{\Psi}_r = r_r \tilde{i}_r + \frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt} - j\omega_r \tilde{\Psi}_r , \quad (2.22)$$

где  $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_r$  – текущая угловая частота вращения ротора.

Переход к неподвижной системе координат в уравнении ротора привел к разделению слагаемого, соответствующего ЭДС индукции, на две составляющие. Первая составляющая  $\frac{d\tilde{\Psi}_r}{dt}$  связана с изменением потокосцепления во времени вследствие изменения во времени токов и называется ЭДС трансформации, по аналогии с процессом ее возбуждения в соответ-

ствующей электрической машине. Вторая –  $\omega_r \tilde{\Psi}_r$ , связана с изменением потокосцепления вследствие вращения ротора и называется ЭДС вращения. Разложение ЭДС индукции на составляющие является математической операцией, связанной с преобразованием системы координат при условии инвариантности мощности, но в некоторых случаях его можно истолковать, исходя из физических процессов в машине.

Уравнения (2.19) и (2.22) записаны в неподвижной системе координат. Запишем эти уравнения в виде системы уравнений в некоторой произвольной системе координат  $[m, n]$ , вращающейся с угловой частотой  $\omega_k$ . Для этого нужно проделать преобразования аналогичные преобразованиям, выполненным при выводе выражения (2.22). В результате получим уравнения статора и ротора электрической машины:

$$\begin{cases} \tilde{u}_s^{(mn)} = r_s \tilde{i}_s^{(mn)} + \frac{d\tilde{\Psi}_s^{(mn)}}{dt} + j\omega_k \tilde{\Psi}_s^{(mn)}; \\ \tilde{u}_r^{(mn)} = r_r \tilde{i}_r^{(mn)} + \frac{d\tilde{\Psi}_r^{(mn)}}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) \tilde{\Psi}_r^{(mn)} \end{cases} \quad (2.23)$$

Из выражений (2.23) уравнения для любых систем координат получаются простой подстановкой соответствующей угловой скорости вращения  $\omega_k$ .

Выражения (2.23) показывают, что выбором системы координат можно, исключить ЭДС вращения, но только в одном из уравнений. Полагая  $\omega_k = 0$ , мы получим уравнения в неподвижной системе координат  $[\alpha, \beta]$  и исключим ЭДС вращения в уравнении статора, а в системе координат  $[d, q]$ , вращающейся синхронно с ротором  $\omega_k = \omega_r$ , ЭДС вращения обращается в нуль в уравнении ротора.

Основной конечной величиной характеризующей электромеханическое преобразование является электромагнитный момент на валу. Он образуется в результате взаимодействия магнитного поля и тока, протекающего в обмотках статора или ротора, и может быть представлен в виде векторного произведения тока на поток:

$$\tilde{M} = \frac{K_\phi}{2} \cdot Z_p \cdot (\tilde{\Psi}_s \times \tilde{i}_s) = \frac{K_\phi}{2} \cdot Z_p \cdot (\tilde{\Psi}_r \times \tilde{i}_r). \quad (2.24)$$

Во многих случаях для моделирования и проектирования систем управления АД необходимо использовать другие пары переменных, тогда в формуле момента появляется коэффициент  $K_{\text{вп}}$ , зависящий от выбора векторов

$$\tilde{M} = \frac{K_{\phi}}{2} \cdot Z_p \cdot K_{\text{вп}} \cdot (\tilde{a} \times \tilde{b}). \quad (2.25)$$

В ортогональной системе координат, например  $[\alpha, \beta]$ , можно использовать восемь уравнений для отыскания электромагнитного момента двигателя. При использовании любого из этих выражений результат будет один и тот же. Заметим, что электромагнитный момент не может быть выражен через произведение основного потока и потоков статора и ротора. Так как асинхронная машина многополюсна и имеет число пар полюсов  $Z_p$ , то значение момента также нужно увеличить пропорционально количеству полюсов.

В выражениях (2.7, 2.24, 2.25) физический смысл имеет только модуль вектора электромагнитного момента и его можно определить через проекции векторов сомножителей. Для произвольных векторов  $a$  и  $b$  модуль векторного произведения равен разности скалярных произведений проекций векторов на ортогональные оси координат, т.е.:

$$|\tilde{M}| = \frac{K_{\phi}}{2} \cdot Z_p \cdot K_{\text{вп}} \cdot \text{Im}(\tilde{a} \times \tilde{b}) = \frac{K_{\phi}}{2} \cdot Z_p \cdot K_{\text{вп}} \cdot (a_m b_n - a_n b_m). \quad (2.26)$$

Поэтому любое из восьми возможных выражений позволяет найти модуль электромагнитного момента  $M = |M|$ , выразив входящие в него векторы через их проекции на координатные оси. Например, электромагнитный момент определяется через произведение потокосцепления ротора на ток статора в виде:

$$|\tilde{M}| = \frac{K_{\phi}}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \text{Im}(\tilde{\psi}_r \times \tilde{i}_s) = \frac{K_{\phi}}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \psi_{r\alpha} i_{s\beta}). \quad (2.27)$$

Выбор того или иного вида уравнения для электромагнитного момента осуществляется из условия рационального построения структурной схемы математической модели. Для асинхронного двигателя с несимметричным статором и симметричным короткозамкнутым ротором наиболее удобно использовать произведение  $\tilde{\psi}_r \times \tilde{i}_s$ .

## 2.5. Математическая модель конденсаторного асинхронного двигателя

Конденсаторный асинхронный двигатель имеет на статоре две обмотки, занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90 эл. град. Одну из обмоток – главную – включают непосредственно в однофазную сеть, а другую – вспомогательную – включают в эту же сеть через рабочий конденсатор  $C_p$  (рис. 2.1, а). Обмотки обычно делятся на две части, поэтому количество физических полюсов вдвое больше количества магнитных полюсов.

Наиболее характерной чертой таких машин является несимметрия обмотки статора, которая обусловлена несимметричным включением или несимметричным выполнением обмотки статора. Короткозамкнутый ротор выполняется, как правило, симметричным.

В отличие от чисто однофазного асинхронного двигателя в конденсаторном двигателе вспомогательная обмотка после пуска не отключается и остается включенной в течение всего периода работы, при этом емкость  $C_p$  создает фазовый сдвиг между токами  $I_A$  и  $I_B$ .

Таким образом, если однофазный асинхронный двигатель по окончании процесса пуска работает с пульсирующей МДС статора, то конденсаторный двигатель – с вращающейся. Поэтому конденсаторные двигатели по своим свойствам приближаются к трехфазным двигателям.

Необходимая для получения кругового вращающегося поля величина емкости конденсатора, мкФ:

$$C_{\text{раб}} = \frac{1.6 \cdot 10^5 I_A \sin \varphi_A}{f_1 U_A k^2}, \quad (2.28)$$

где  $\varphi_A$  – угол сдвига между током  $I_A$  и напряжением  $U_A$  при круговом поле;  $k = \frac{\omega_B k_B}{\omega_A k_A}$  – коэффициент трансформации, представляющий собой отношение эффективных чисел витков вспомогательной и главной обмоток;  $k_A$  и  $k_B$  – обмоточные коэффициенты обмоток статора.

Анализ (2.28) показывает, что емкость  $C_p$  обеспечивает получение кругового вращающегося поля лишь для одного, вполне определенного режима работы двигателя. В этом режиме работы угол сдвига фаз между

токаmi составляет  $90^0$ , и в машине создается круговое вращающееся магнитное поле. Если же изменится режим (нагрузка), то изменятся ток  $I_A$  и фазовый угол  $\varphi_A$ , а, следовательно, и величина емкости  $C_p$ , соответствующая круговому полю.

Таким образом, если нагрузка двигателя отличается от расчетной величины, то вращающееся поле двигателя становится эллиптическим и рабочие свойства двигателя ухудшаются. Обычно расчет  $C_p$  ведут для номинальной нагрузки или близкой к ней.

Оптимальное значение емкости рабочего конденсатора можно определить путем моделирования работы двигателя, однако целесообразно заранее оценить эту величину, применив одну из приближенных методик (без учёта скольжения):

$$C_{\text{раб}} = \frac{1}{\omega_c \cdot X_c}, \quad (2.29)$$

где  $\omega_c$  – номинальная электрическая частота напряжения питания статора, рад/с;  $X_c$  – сопротивление конденсатора при промышленной частоте сети;

$$X_c \approx X_{\text{срб}} + X_m - R_p \cdot \text{tg} \left( \arctg \left( \frac{X_{\text{сгa}} + X_m}{R_a} \right) - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.30)$$

Обладая сравнительно высокими значениями КПД и коэффициента мощности ( $\cos\varphi = 0,80-0,95$ ), конденсаторные двигатели имеют неудовлетворительные пусковые свойства, так как емкость  $C_p$  обеспечивает круговое поле лишь при расчетной нагрузке, а при пуске двигателя поле статора эллиптическое. При этом пусковой момент обычно не превышает  $0,5 M_n$ .

Для повышения пускового момента параллельно емкости  $C_p$  включают емкость  $C_{\text{п}}$ , называемую пусковой (рис. 2.1, а). Величину  $C_{\text{п}}$  выбирают, исходя из условия получения кругового поля статора при пуске двигателя, т.е. получения наибольшего пускового момента. По окончании пуска емкость  $C_{\text{п}}$  следует отключить. Величина ёмкости пускового конденсатора выбирается в  $(2\div 3)$  раза большей, чем величина ёмкости рабочего конденсатора.

При выборе типа конденсатора следует помнить, что его рабочее напряжение определяется амплитудным значением синусоидального напряжения, приложенного к конденсатору  $U_c$ . При круговом вращающемся поле это напряжение превышает напряжение сети  $U_1$  и определяется выражением

$$U_C = U_1 \sqrt{1+k^2}, \quad (2.31)$$

Конденсаторные двигатели иногда называют двухфазными, так как обмотка статора этого двигателя содержит две фазы. Двухфазные двигатели могут работать и без конденсатора или другого фазосдвигающего элемента, если к фазам обмотки статора подвести двухфазную систему напряжений (два напряжения, одинаковые по значению и частоте, но сдвинутые по фазе относительно друг друга на  $90^\circ$ ).

Система уравнений КАД может быть получена из системы уравнений (2.7). Уравнения электрического равновесия статора и ротора можно представить в некоторой произвольной системе координат  $[m, n]$ , вращающейся с угловой скоростью  $\omega_k$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sm} = r_{sm} i_{sm} + \frac{d\Psi_{sm}}{dt} - \omega_k \Psi_{sn} \\ U_{sn} = r_{sn} i_{sn} + \frac{d\Psi_{sn}}{dt} + \omega_k \Psi_{sm} \\ U_{rm} = r_{rm} i_{rm} + \frac{d\Psi_{rm}}{dt} - [\omega_k - \omega_r] \Psi_{rm} \\ U_{rn} = r_{rn} i_{rn} + \frac{d\Psi_{rn}}{dt} + [\omega_k - \omega_r] \Psi_{rm} \end{array} \right. \quad (2.32)$$

Далее уравнения (2.32) следует преобразовать и дополнить исходя из следующих соображений:

– при переходе к неподвижной системе координат  $[\alpha, \beta]$   $\omega_k = 0$ ;

– ротор двигателя короткозамкнут, следовательно  $U_{ra} = U_{r\beta} = 0$ ;

– обе статорные обмотки подключены к одной и той же фазе напряжения, однако в цепь вспомогательной обмотки последовательно включен конденсатор  $C_\beta$ . Из этого следует, что  $U_s = U_{s\alpha} = U_{s\beta} + \frac{1}{C_\beta} \int i_{s\beta} dt$ . Значение

емкости конденсатора равно:

- $C_\beta = C_p$  – для двигателей с рабочим конденсатором;
- $C_\beta = C_p + C_n$  – для двигателей с рабочим и пусковым конденсатором;
- $C_\beta = C_n$  – для двигателей с пусковым конденсатором.

Тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = r_{s\alpha} i_{s\alpha} + \frac{d\Psi_{s\alpha}}{dt} \\ U_s = r_{s\beta} i_{s\beta} + \frac{d\Psi_{s\beta}}{dt} + \frac{1}{C_\beta} \int i_{s\beta} dt \\ 0 = r_{r\alpha} i_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \Psi_{r\beta} \\ 0 = r_{r\beta} i_{r\beta} + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \Psi_{r\alpha} \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Поскольку для расчета момента двигателя было выбрано уравнение, основанное на векторном произведении потока ротора на ток статора, то все прочие вектора (либо их проекции на координатные оси) должны быть также выражены через поток ротора и ток статора. Для этого воспользуемся соотношениями (2.17):

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{r\alpha} = \frac{1}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} - \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{s\alpha} \\ i_{r\beta} = \frac{1}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} - \frac{L_m}{L_r} \cdot i_{s\beta} \\ \Psi_{s\alpha} = \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} + \left( L_{s\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot i_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} = \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} + \left( L_{s\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot i_{s\beta} \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Подставив (2.34) в уравнения (2.33), получим уравнения электрического равновесия статора и ротора в форме, пригодной для дальнейшего составления структурной схемы и моделирования двигателя:

$$\left\{ \begin{array}{l}
U_s = r_{s\alpha} i_{s\alpha} + \left( L_{s\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} \\
U_s = \frac{1}{C_\beta} \int i_{s\beta} dt + r_{s\beta} i_{s\beta} + \left( L_{s\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\alpha} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_{r\beta} \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\beta} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha}
\end{array} \right. \quad (2.35)$$

Из третьего и четвертого уравнения системы (2.35) следует, что ЭДС вращения представлены в уравнениях разноименными проекциями, что приводит к появлению перекрестных связей в структуре модели машины. Проекции векторов на оси координат можно рассматривать как величины, соответствующие обмоткам, расположенным на взаимноперпендикулярных осях. В таком случае уравнения (2.35) будут соответствовать двухфазной электрической машине, которой и является конденсаторный двигатель.

Электромагнитный момент на валу образуется в результате взаимодействия магнитного поля и тока, протекающего в обмотках статора или ротора, и в общем случае может быть представлен в виде векторного произведения тока на поток. Выбор пары векторов для расчета электромагнитного момента осуществляется из условия рационального построения структурной схемы математической модели. Для асинхронного двигателя с несимметричным статором и симметричным короткозамкнутым ротором наиболее удобно использовать произведение  $\tilde{\psi}_r \times \tilde{i}_s$ . Тогда электромагнитный момент на валу конденсаторного асинхронного двигателя в осях  $[\alpha, \beta]$  рассчитывается по формуле, Нм:

$$|\tilde{M}| = \frac{K_\Phi}{2} \cdot Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\alpha} i_{s\beta}), \quad (2.36)$$

где  $K_\Phi = 2$  – коэффициент, зависящий от количества фаз статора.

Уравнения (2.35), (2.36) и уравнение движения электропривода из (2.7) образуют систему уравнений, однозначно определяющую состояние конденсаторного двигателя в произвольный момент времени:

$$\left\{ \begin{array}{l}
J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c \\
M = Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\alpha} i_{s\beta}) \\
U_s = r_{s\alpha} i_{s\alpha} + \left( L_{s\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} \\
U_s = \frac{1}{C_\beta} \int i_{s\beta} dt + r_{s\beta} i_{s\beta} + \left( L_{s\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{s\beta}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \cdot \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\alpha} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} + \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_r \cdot \Psi_{r\beta} \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\beta} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} + \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} - \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha}
\end{array} \right. \quad (2.37)$$

Эту же систему можно записать в операторном виде, введя оператор дифференцирования  $dx/dt \rightarrow x \cdot p$ . Тогда система уравнений принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
J \cdot \omega \cdot p = M - M_c \\
M = Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\alpha} i_{s\beta}) \\
U_s = r_{s\alpha} i_{s\alpha} + \left( L_{s\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot i_{s\alpha} \cdot p + \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} \cdot p \\
U_s = \frac{1}{C_\beta} \cdot i_{s\beta} \cdot \frac{1}{p} + r_{s\beta} i_{s\beta} + \left( L_{s\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot i_{s\beta} \cdot p + \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} \cdot p \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\alpha} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} + \Psi_{r\alpha} \cdot p + \omega_r \cdot \Psi_{r\beta} \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\beta} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} + \Psi_{r\beta} \cdot p - \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha}
\end{array} \right. \quad (2.38)$$

Структурная схема однофазного конденсаторного асинхронного двигателя с рабочим конденсатором, построенная по уравнениям (2.38) с учетом вышеизложенных соображений, представлена на рис. 2.2. Структурная схема конденсаторного асинхронного двигателя с рабочим и пусковым конденсатором представлена на рис. 2.3.

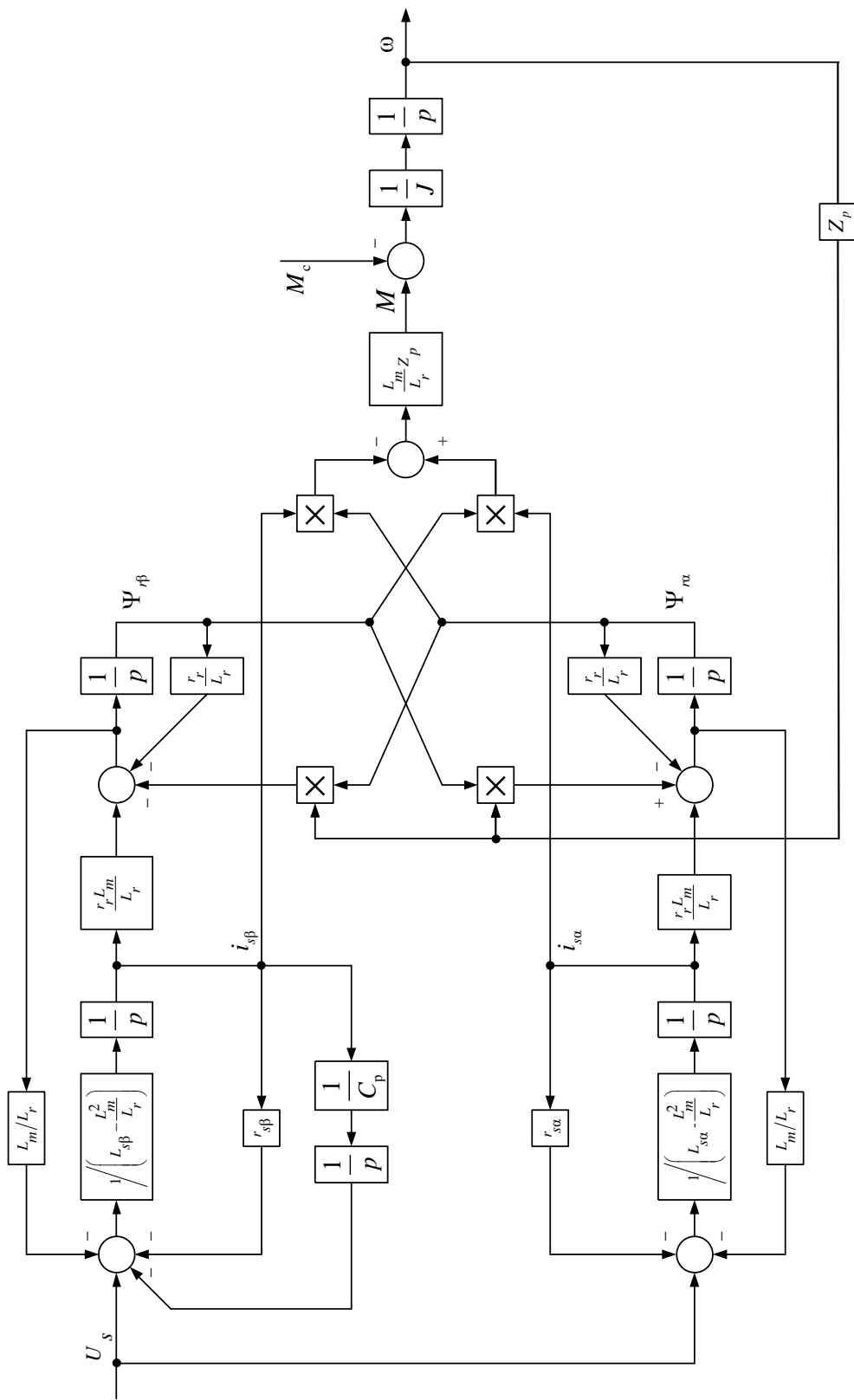


Рисунок 2.2 – Структурная схема двигателя с рабочим конденсатором

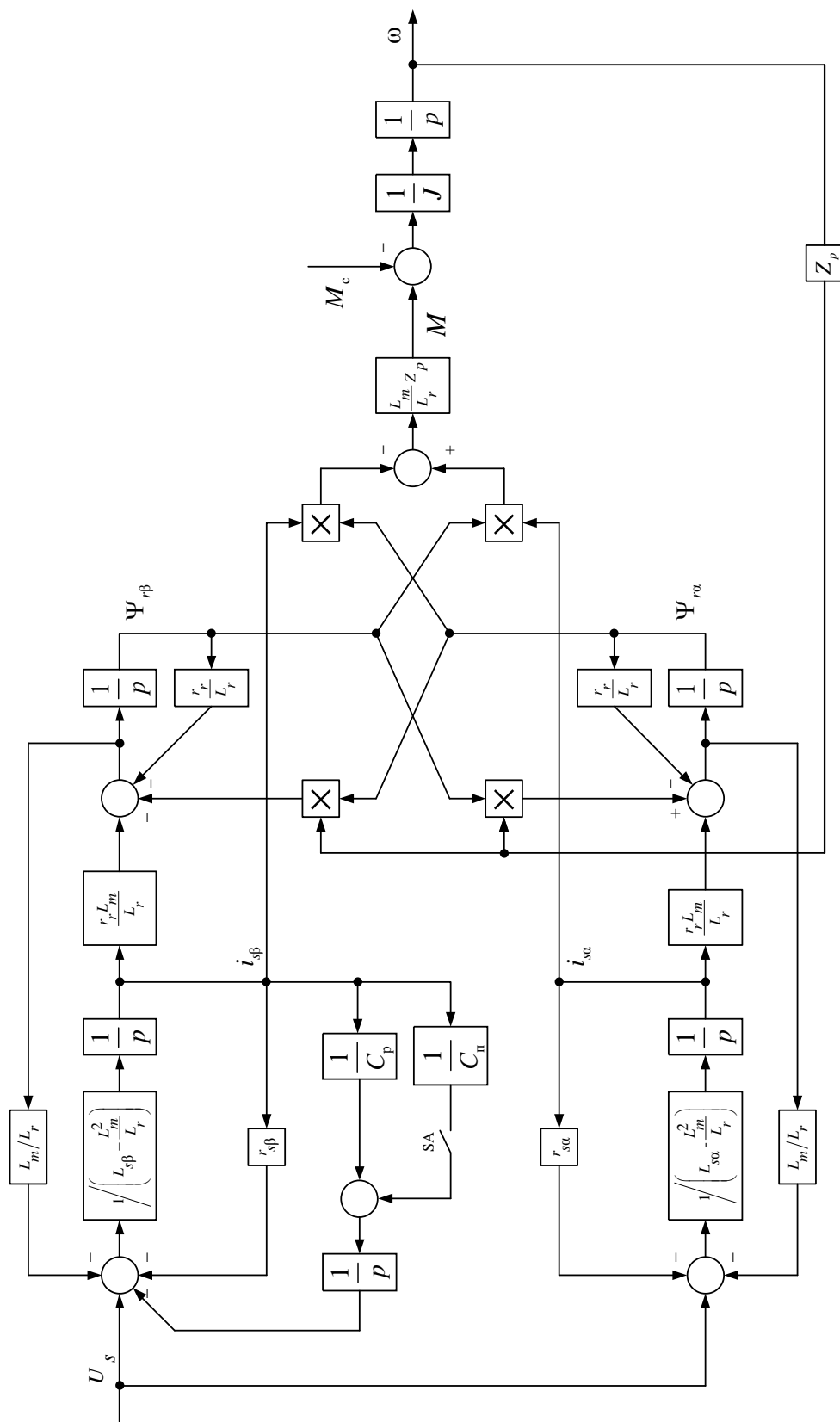


Рисунок 2.3 – Структурная схема двигателя с рабочим и пусковым конденсатором

В справочных данных для асинхронных двигателей обычно приводятся активные и индуктивные сопротивления статорных обмоток и приведенные значения роторных. В структурных схемах (рис. 2.2, 2.3) параметрами двигателя являются активные сопротивления и индуктивности.

Индуктивности от главного магнитного потока  $L_m$  и потоков рассеяния  $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$  рассчитываются по формулам, Гн:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_c}; \quad L_{s\sigma} = \frac{X_{s\sigma}}{\omega_c}; \quad L_{r\sigma} = \frac{X_{r\sigma}}{\omega_c}, \quad (2.39)$$

где  $\omega_c = 2\pi f_c$  – номинальная электрическая частота питания статора,  $c^{-1}$ .

Полные сопротивления статорной и роторной обмотки рассчитываются как:

$$L_{s\alpha} = L_{s\sigma\alpha} + L_m; \quad L_{s\beta} = L_{s\sigma\beta} + L_m; \quad L_r = L_{r\sigma} + L_m, \quad (2.40)$$

Запишем выражения для напряжений, питающих обмотки статора:

$$\begin{cases} U_{s\alpha} = U_m \cos(\omega_c t + \varphi_0) \\ U_{s\beta} = U_m \sin(\omega_c t + \varphi_0) \end{cases}. \quad (2.41)$$

Для получения структурной схемы источника питания воспользуемся системой уравнений (2.2). Обе фазы конденсаторного двигателя подключаются к одному источнику электроэнергии, поэтому можно записать:

$$U_s = U_{s\alpha} = U_{s\beta} + \frac{1}{C_\beta} \int i_{s\beta} dt = U_m \sin(\omega_c t + \varphi_0). \quad (2.42)$$

Промоделировать такое напряжение можно с помощью схемы, представленной на рис. 2.4.

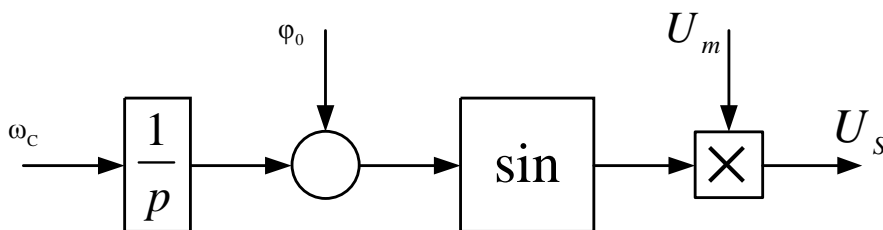


Рисунок 2.4 – Схема задания напряжения

Моделирование переходных процессов при пуске конденсаторных асинхронных двигателей проводилось для АД, параметры которых были рассчитаны в [1] и приведены в приложении 1 (табл. П.1.1 – П.1.2).

При исследовании двигателя с рабочим конденсатором (рис. 2.2) пуск производился либо на холостом ходу с последующим набросом нагрузки ( $M_c=M_n=const$ ) в установившемся режиме, либо при вентиляторной нагрузке. Графики переходных процессов приведены на рис. 2.5 – 2.6.

На рис. 2.7 приведены зависимости изменения тока в обмотках статора при набросе нагрузки после разгона в установившемся режиме, а на рис. 2.8 – при вентиляторной нагрузке. Фазовый сдвиг между токами при пуске составляет примерно  $105^\circ$ . Потребляемый двигателем ток при пуске распределяется между фазами неравномерно. Ток в рабочей обмотке, непосредственно подключенной к источнику питания (фаза *A*), приблизительно в десять раз превышает ток во вспомогательной обмотке, подключенной через конденсатор (фаза *B*). Соответственно магнитный поток, создаваемый фазой *A*, больше магнитного потока, создаваемого фазой *B*. Следовательно, вращающееся магнитное поле будет эллиптическим.

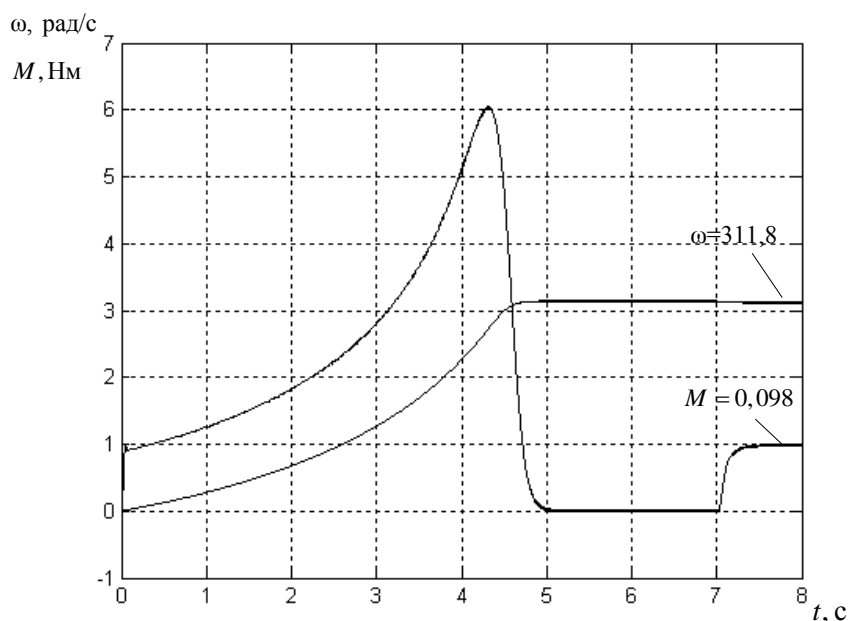


Рисунок 2.5 – Переходные процессы при пуске двигателя на холостом ходу с набросом нагрузки после разгона двигателя

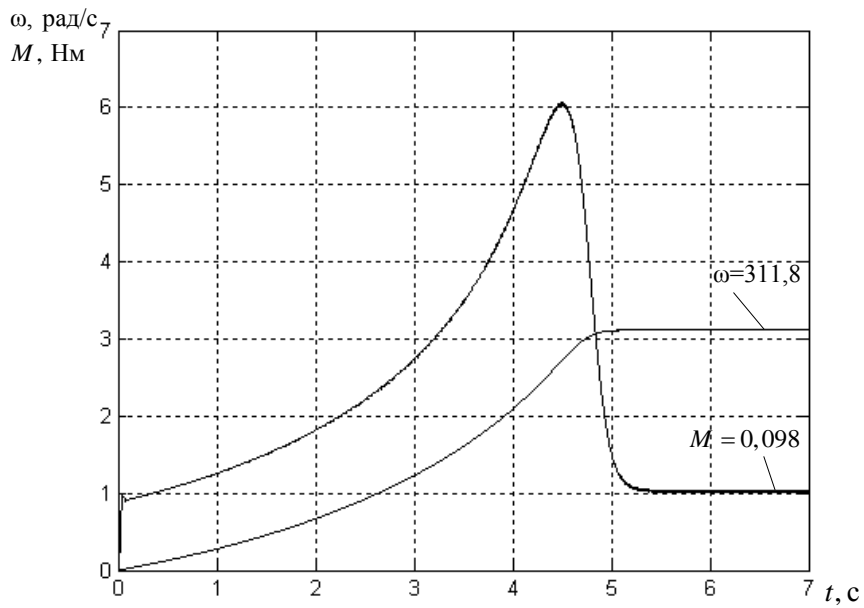


Рисунок 2.6 – Переходные процессы при пуске двигателя при вентиляторной нагрузке

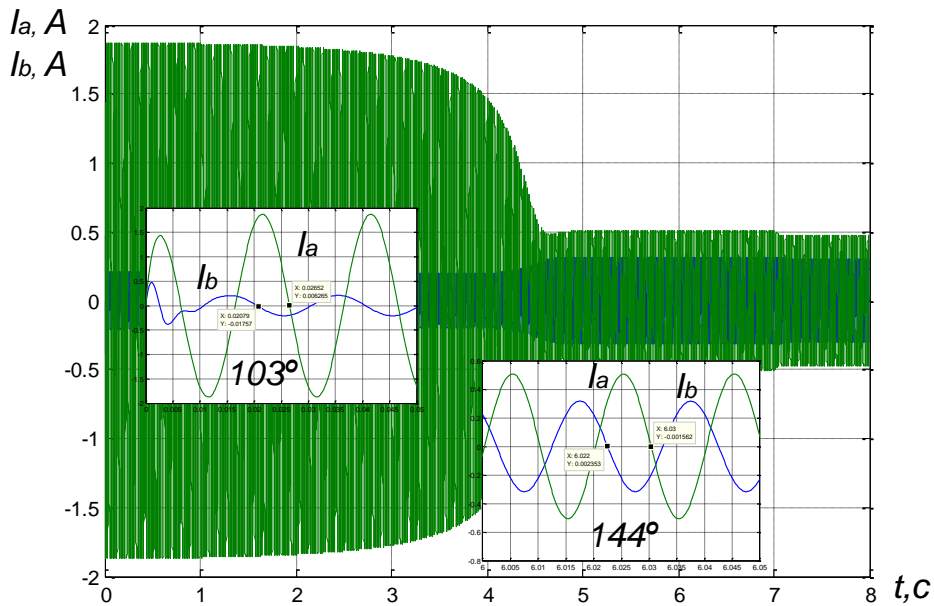


Рисунок 2.7 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя при набросе нагрузки

В установившемся режиме работы под нагрузкой происходит выравнивание токов обеих фаз двигателя (ток в фазе *A* больше тока в фазе *B* в полто-

ра раза), угол фазового сдвига равен  $144^{\circ}$ . В результате эллиптичность вращающегося поля машины будет выражена меньше. Для приближения формы магнитного поля к круговому полю необходимо корректировать емкость рабочего конденсатора с целью обеспечения величины фазового сдвига  $90^{\circ}$ .

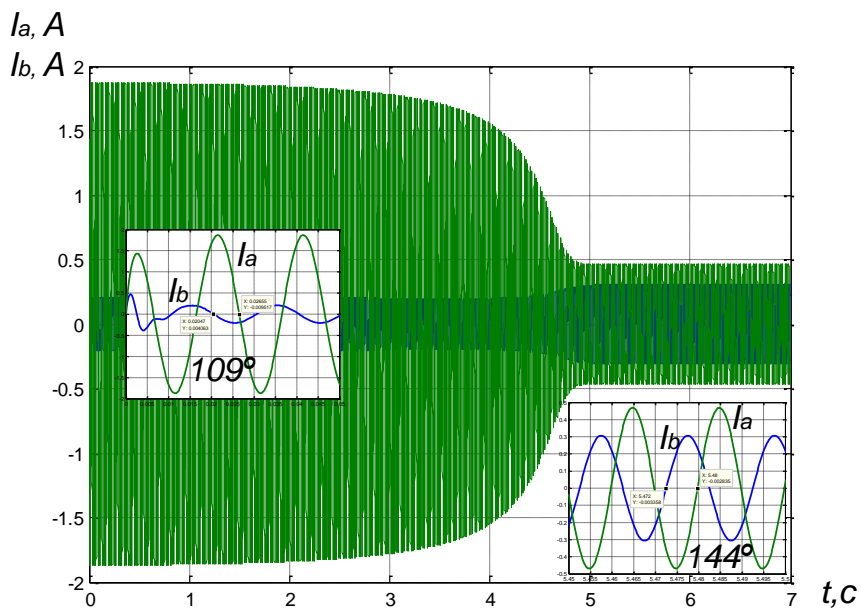


Рисунок 2.8 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя при вентиляторной нагрузке

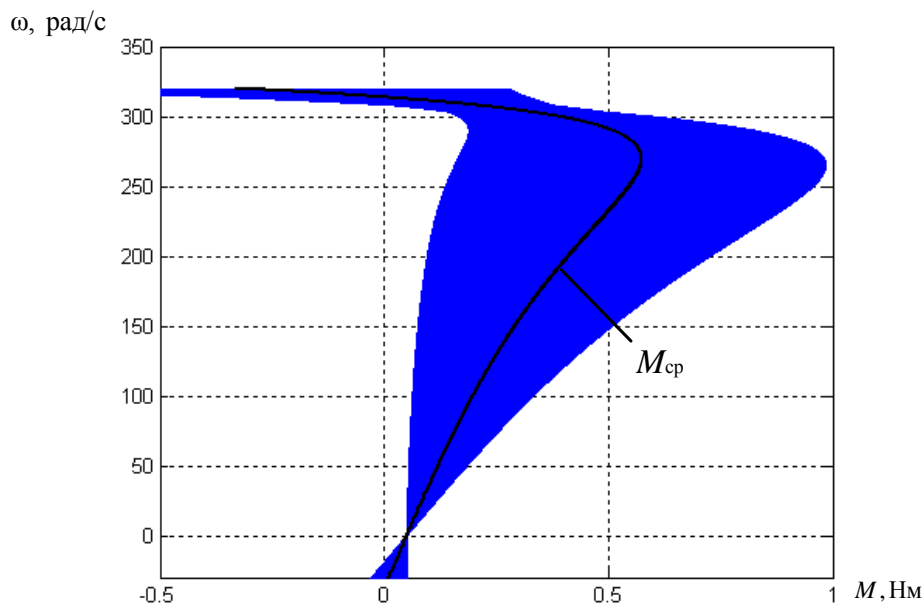


Рисунок 2.9 – Механическая характеристика двигателя с рабочим конденсатором

На рис. 2.9 изображена механическая характеристика двигателя (среднее и мгновенное значения электромагнитного момента). Пусковой момент примерно равен 0,05 Н·м, т.е. его величина почти в 2 раза меньше номинального момента двигателя. Поэтому пуск двигателя под нагрузкой, близкой к номинальному значению, возможен только при подключении пускового конденсатора.

Моделирование пуска конденсаторного АД под нагрузкой с подключением пускового конденсатора параллельно рабочему конденсатору на время пуска выполнялось с использованием структурной схемы, приведенной на рис. 2.3. Графики переходных процессов пуска при постоянной нагрузке ( $M_c=M_n=const$ ) и при вентиляторной нагрузке приведены на рис. 2.10 – 2.11. За счет увеличения пускового момента время разгона двигателя при вентиляторной нагрузке (рис. 2.11), по сравнению с двигателем с рабочим конденсатором (рис. 2.6), уменьшается.

Зависимости изменения тока в обмотках статора при пуске двигателя с рабочим и пусковым конденсаторами приведены на рис. 2.12. Неравномерность распределения токов между фазами снижается. При выборе емкости пускового конденсатора  $C_{п} = (1-3) C_{р}$  величина тока в рабочей обмотке (фаза А), превышает ток во вспомогательной обмотке (фаза В) в (4 – 2,5) раза соответственно.

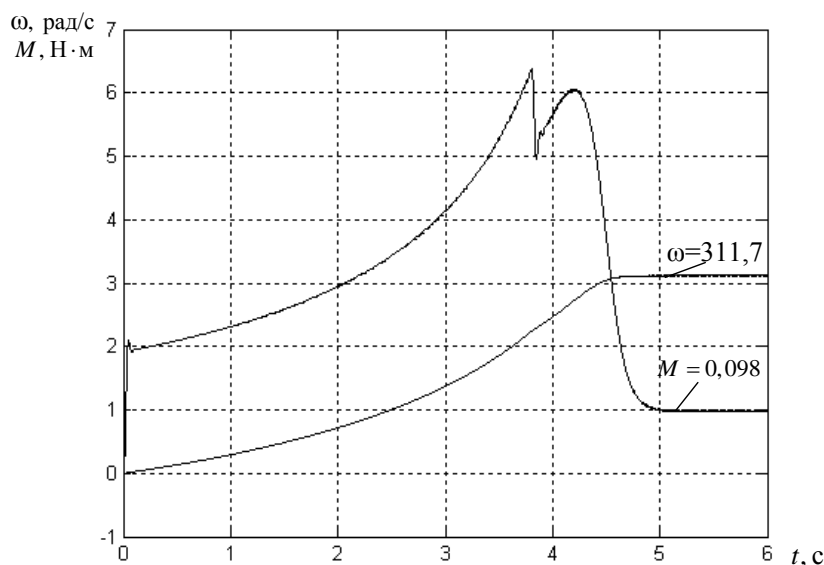


Рисунок 2.10 – Переходные процессы при пуске двигателя под нагрузкой

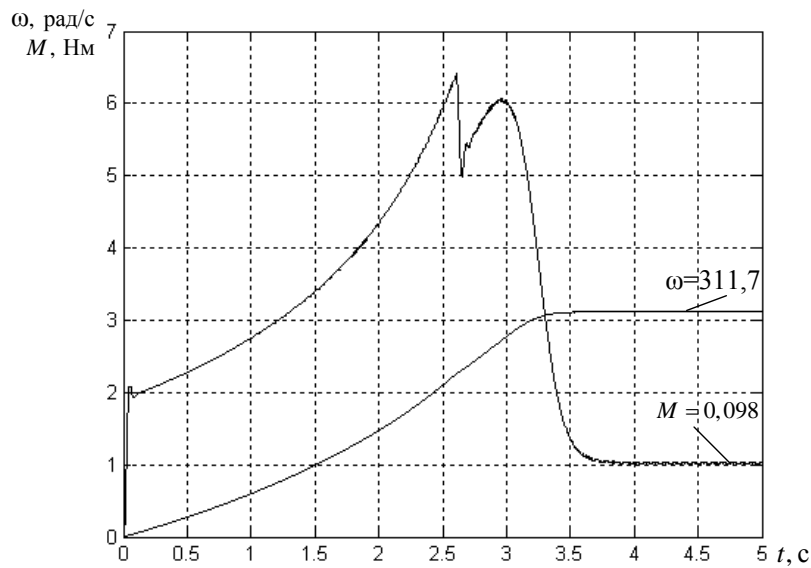


Рисунок 2.11 – Переходные процессы при пуске двигателя при вентиляторной нагрузке

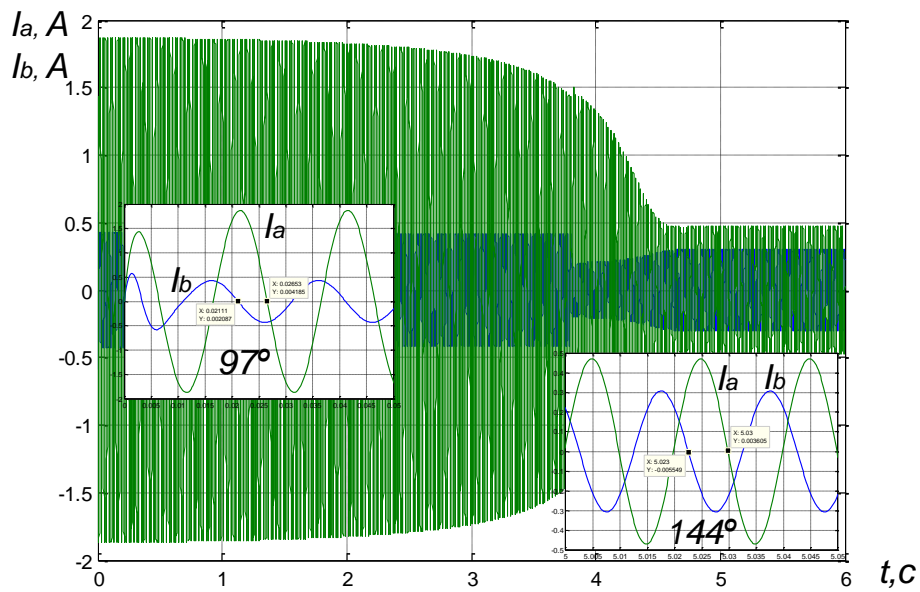


Рисунок 2.12 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя под нагрузкой

Механические характеристики двигателя с рабочим и пусковым конденсатором приведены на рис. 2.13 – 2.14. Величина пускового момента составила 0,15 Нм. На рис. 2.13 показаны характеристики как двигателя с рабочим конденсатором, так и с рабочим и пусковым. На рис. 2.14 приведена результирующая механическая характеристика двигателя (среднее и мгновенное значения электромагнитного момента).

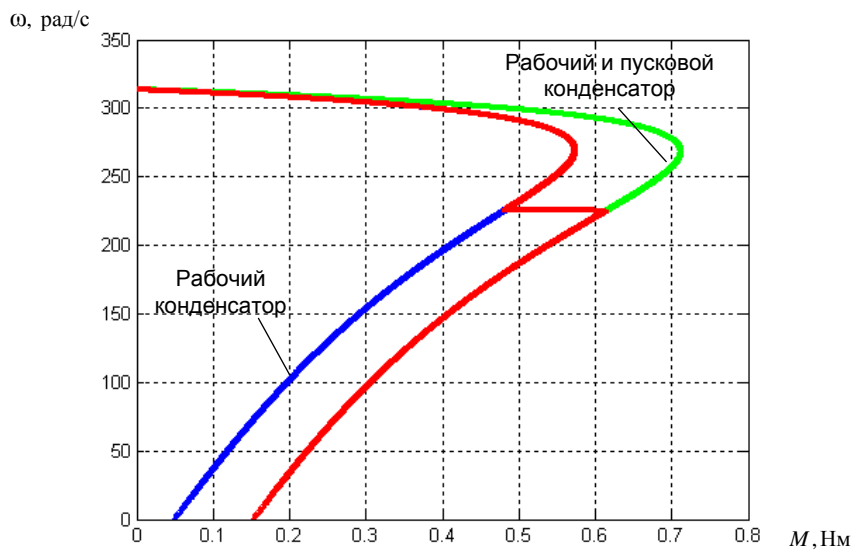


Рисунок 2.13 – Статические механические характеристики двигателя

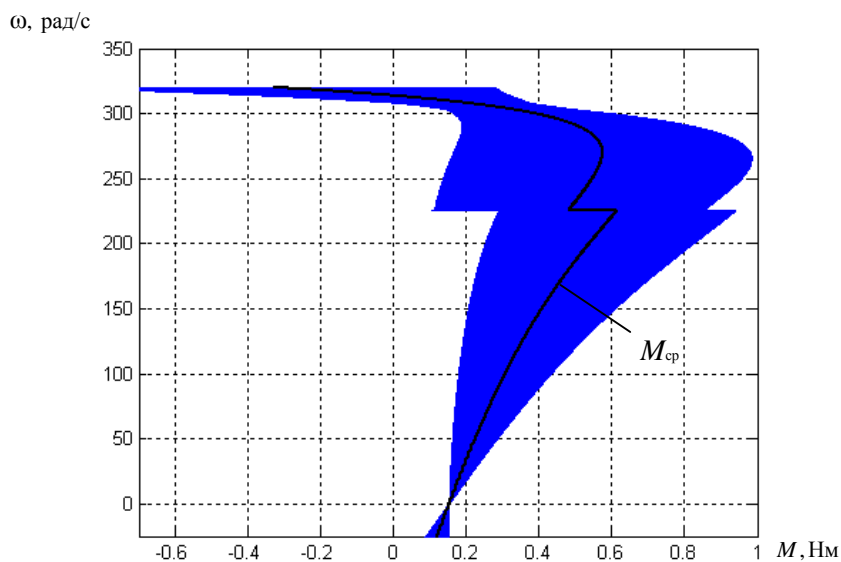


Рисунок 2.14 – Механическая характеристика двигателя с рабочим и пусковым конденсатором

Структурная схема двигателя с пусковым конденсатором приведена на рис. 2.15. Напомним, что при пуске такой двигатель является двухфазным, а после разгона вспомогательная обмотка с пусковым конденсатором отключается и двигатель работает как однофазный. Графики переходных процессов пуска двигателя при постоянной ( $M_c=M_n=const$ ) и при вентиляторной нагрузке приведены на рис. 2.16 – 2.17.

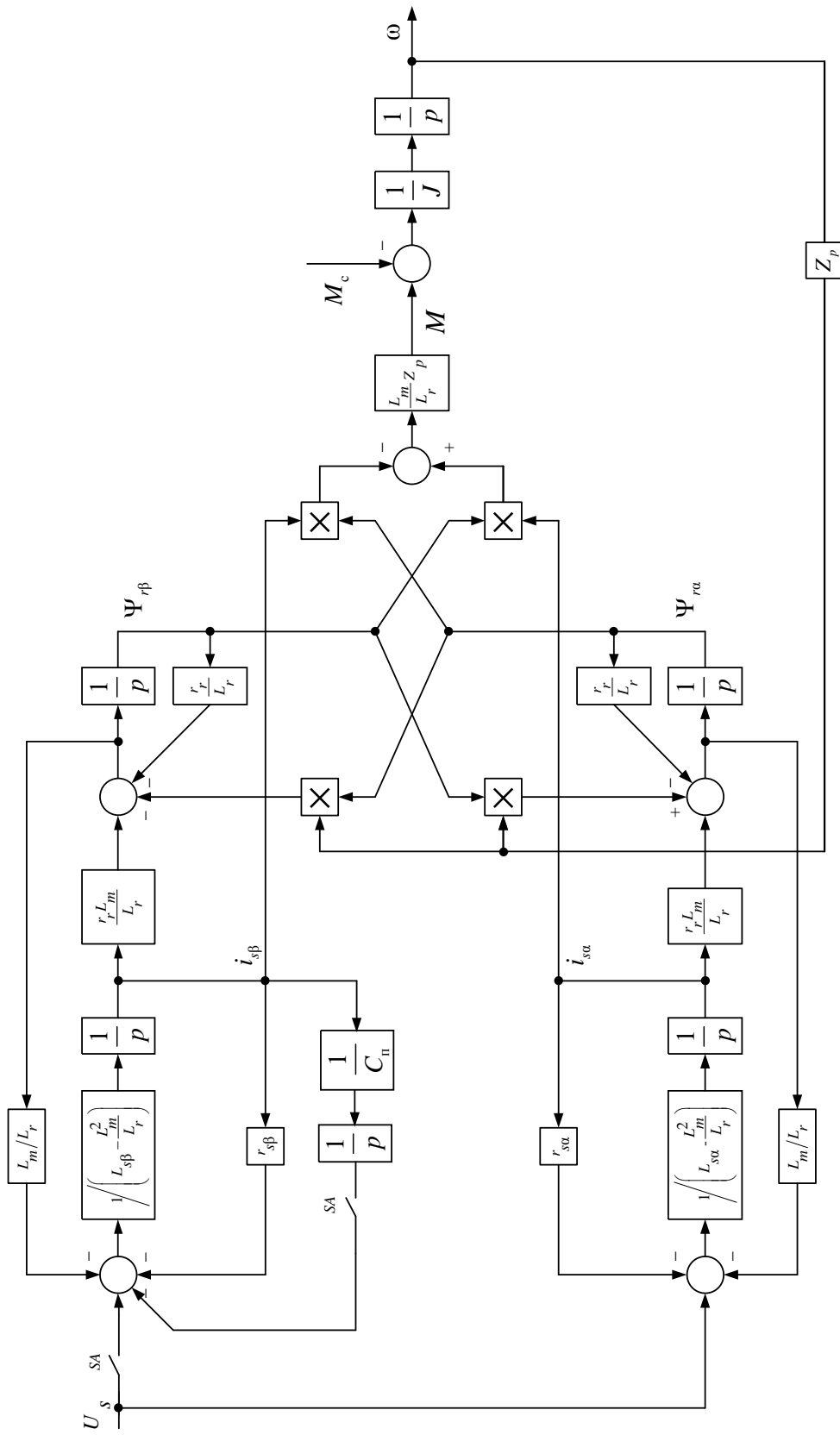


Рисунок 2.15 – Структурная схема двигателя с пусковым конденсатором

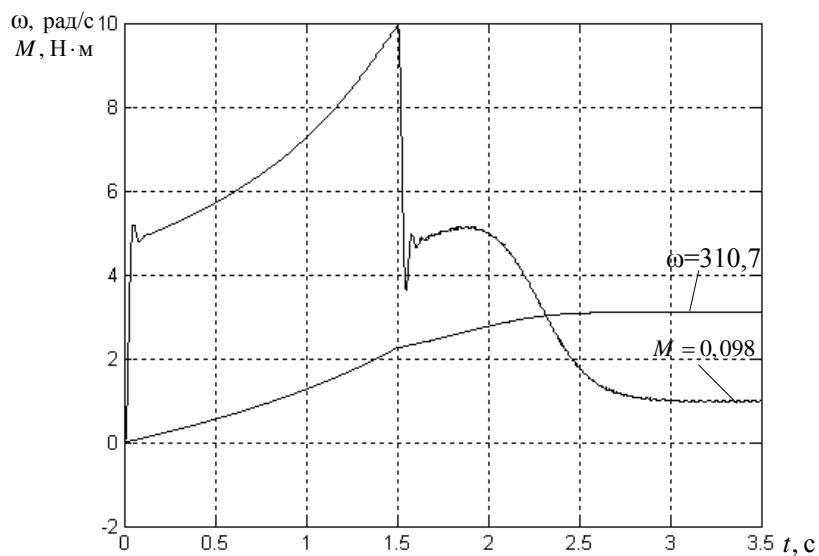


Рисунок 2.16 – Переходные процессы при пуске двигателя под нагрузкой

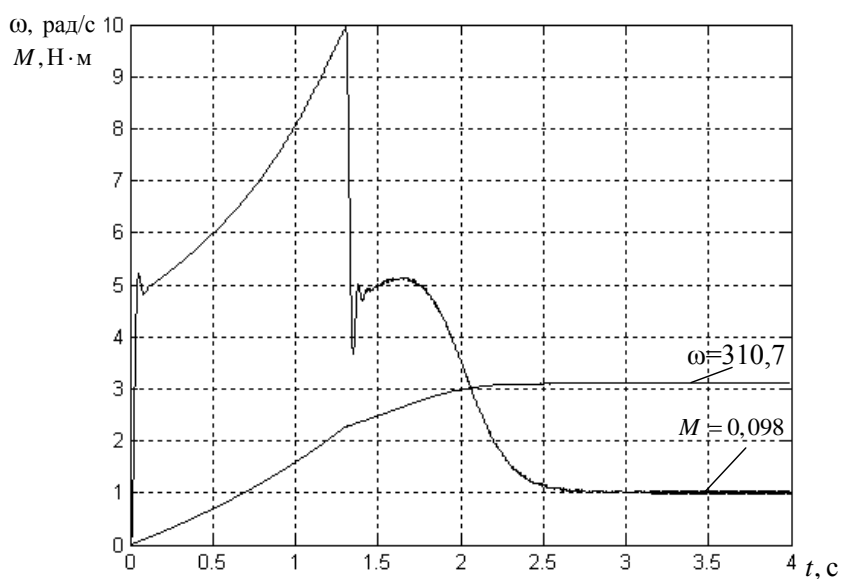


Рисунок 2.17– Переходные процессы при пуске двигателя при вентиляторной нагрузке

Зависимости изменения тока в обмотках статора при пуске приведены на рис. 2.18. Неравномерность распределения токов между фазами меньше, чем в случае двигателя с рабочим и пусковым конденсатором. При выборе емкости пускового конденсатора  $C_{п} = 8 \text{ мкФ}$  величина тока в

рабочей обмотке (фаза  $A$ ), превышает ток во вспомогательной обмотке (фаза  $B$ ) не многим более чем в 2 раза.

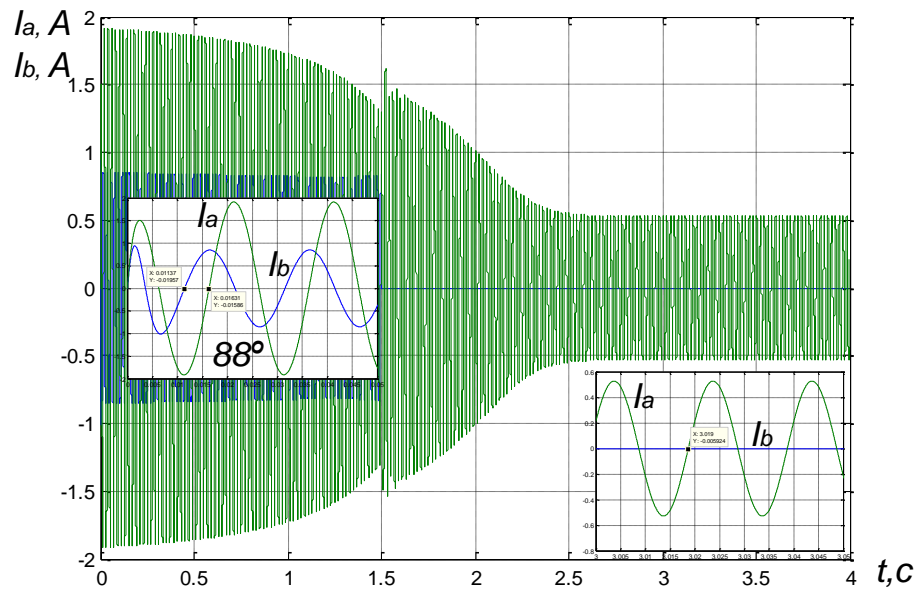


Рисунок 2.18 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя под нагрузкой

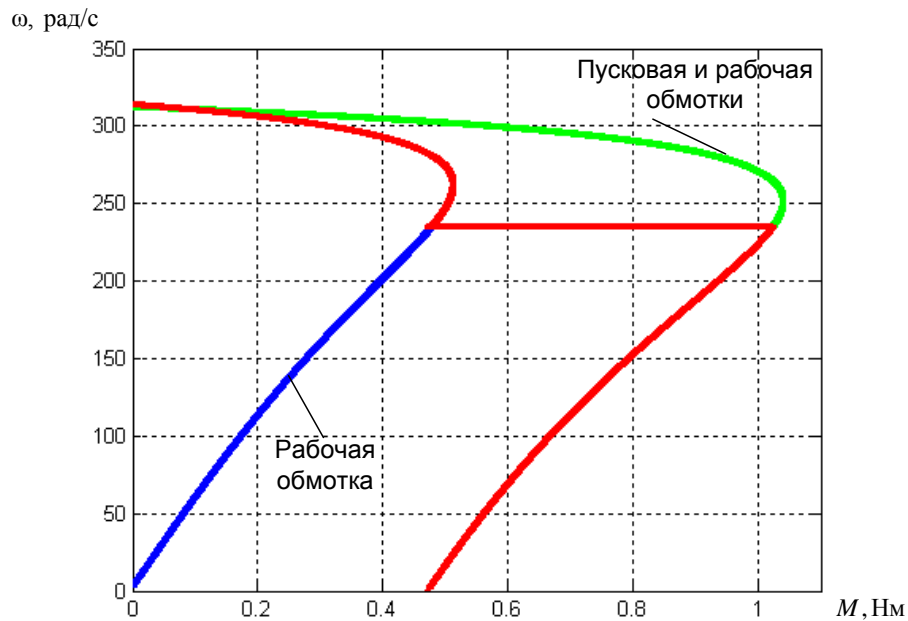


Рисунок 2.19 – Статические механические характеристики двигателя с пусковым конденсатором

Механические характеристики двигателя с пусковым конденсатором приведены на рис. 2.19 – 2.20. Величина пускового момента составила око-

ло 0,5 Нм. На рис. 2.19 показаны характеристики двигателя как с подключенной только рабочей обмоткой, так и с рабочей и пусковой с конденсатором. На рис. 2.20 приведена результирующая механическая характеристика двигателя (среднее и мгновенные значения электромагнитного момента).

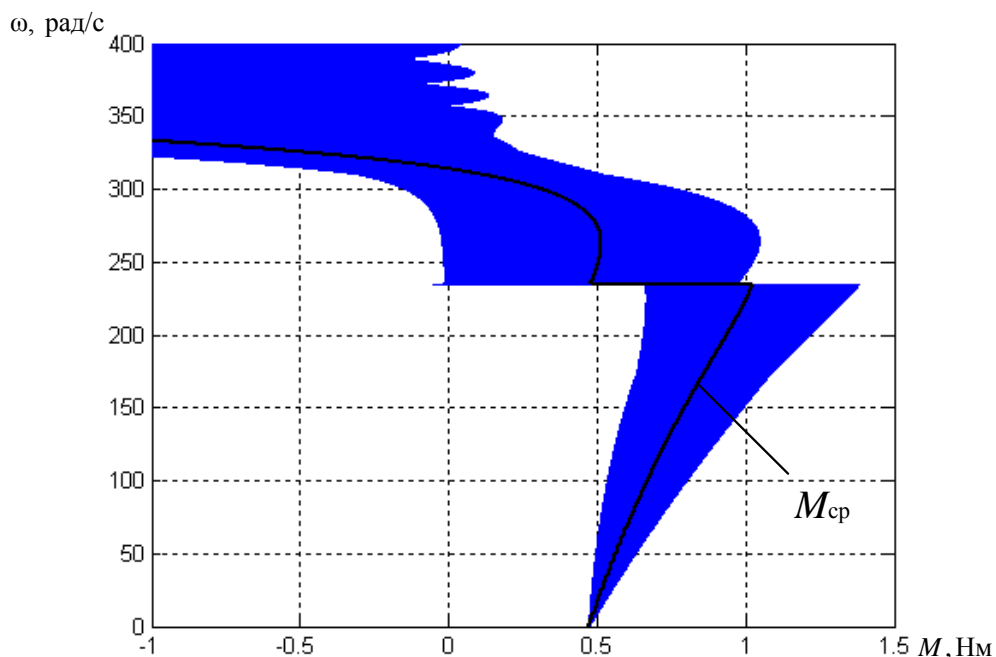


Рисунок 2.20 – Механическая характеристика двигателя с пусковым конденсатором

## 2.6. Математическая модель асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки

Как и двигатель с пусковым конденсатором двигатель с пусковой обмоткой при пуске также является двухфазным, а после разгона вспомогательная (пусковая) обмотка отключается и двигатель работает как однофазный только при подключенной рабочей обмотке.

Система уравнений двигателя с пусковым сопротивлением может быть получена на основе системы (2.38). При пуске эта система уравнений имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l}
J \cdot \omega \cdot p = M - M_c \\
M = Z_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\Psi_{r\beta} i_{s\alpha} - \Psi_{r\alpha} i_{s\beta}) \\
U_s = U_{s\alpha} = r_{s\alpha} i_{s\alpha} + \left( L_{s\alpha} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot i_{s\alpha} \cdot p + \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} \cdot p \\
U_s = U_{s\beta} = r_{s\beta} i_{s\beta} + \left( L_{s\beta} - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot i_{s\beta} \cdot p + \frac{L_m}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} \cdot p \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\alpha} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\alpha} + \Psi_{r\alpha} \cdot p + \omega_r \cdot \Psi_{r\beta} \\
\frac{r_r L_m}{L_r} \cdot i_{s\beta} = \frac{r_r}{L_r} \cdot \Psi_{r\beta} + \Psi_{r\beta} \cdot p - \omega_r \cdot \Psi_{r\alpha}
\end{array} \right. \quad (2.43)$$

После отключения пусковой обмотки в системе уравнений (2.43) необходимо в уравнении 4 принять  $U_{s\beta} = 0$ . Структурная схема двигателя с пусковой обмоткой в соответствии с (2.43) приведена на рис. 2.21.

Моделирование переходных процессов при пуске асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки проводилось для АД, параметры которого также были рассчитаны в [1] и приведены в приложении 1 (табл. П.1.3).

Графики переходных процессов пуска при постоянной ( $M_c = M_n = \text{const}$ ) и при вентиляторной нагрузке приведены на рис. 2.22 – 2.23. Следует отметить, что разгон двигателя с пусковым сопротивлением происходит медленнее, чем конденсаторных асинхронных двигателей. Это объясняется тем, что в двигателе с пусковым сопротивлением фазовый сдвиг токов в рабочей и пусковой обмотке значительно меньше  $90^\circ$ .

На рис. 2.24 изображены переходные процессы токов в обмотках статора двигателя с пусковым сопротивлением. Во время пуска ток, потребляемый двигателем, распределяется между фазами практически равномерно и в отличие от конденсаторного двигателя ток фазы  $B$  превышает значение тока фазы  $A$ . Фазовый сдвиг между токами при разгоне составляет около  $6^\circ$ .

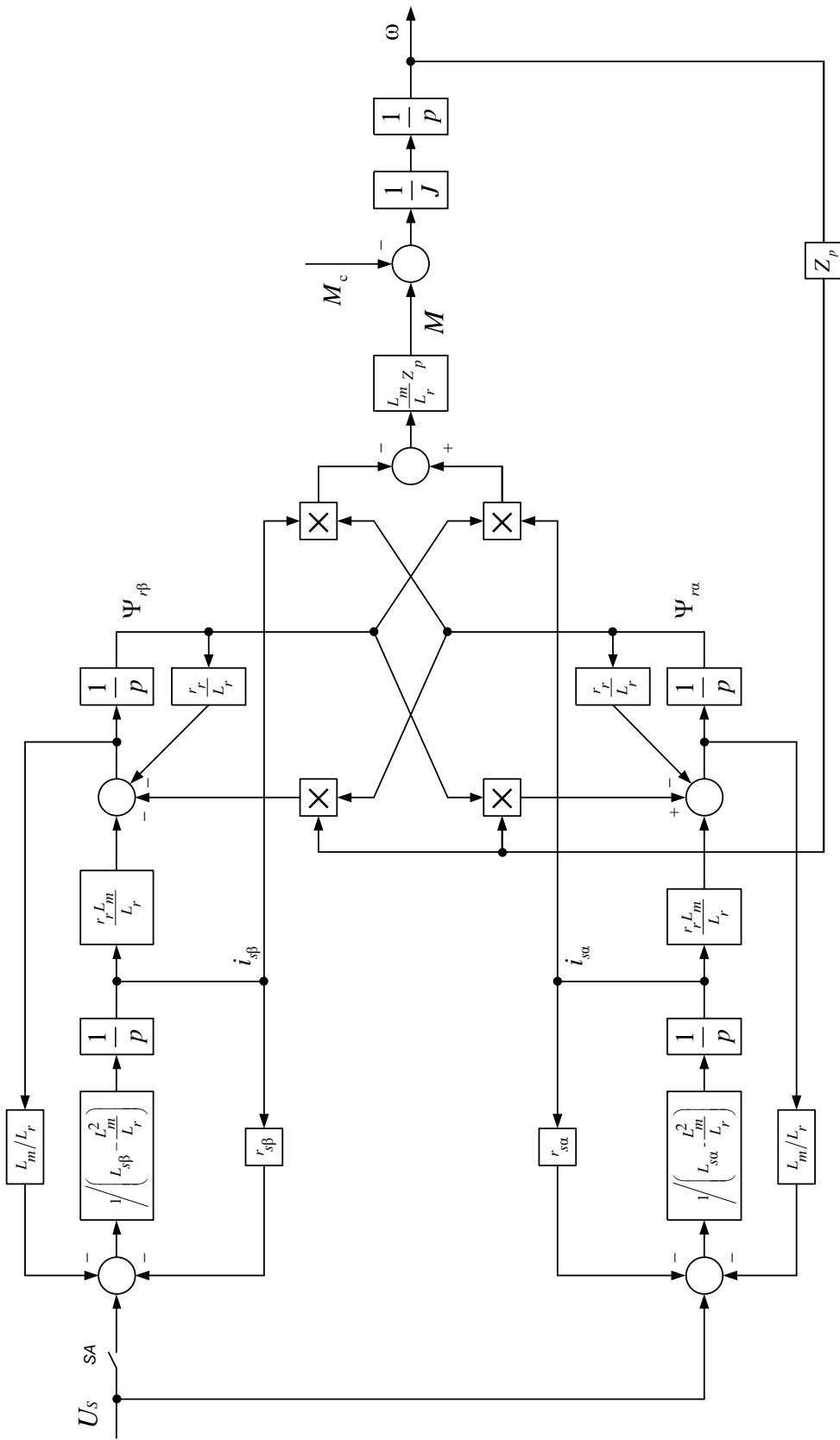


Рисунок 2.21 – Структурная схема двигателя с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки

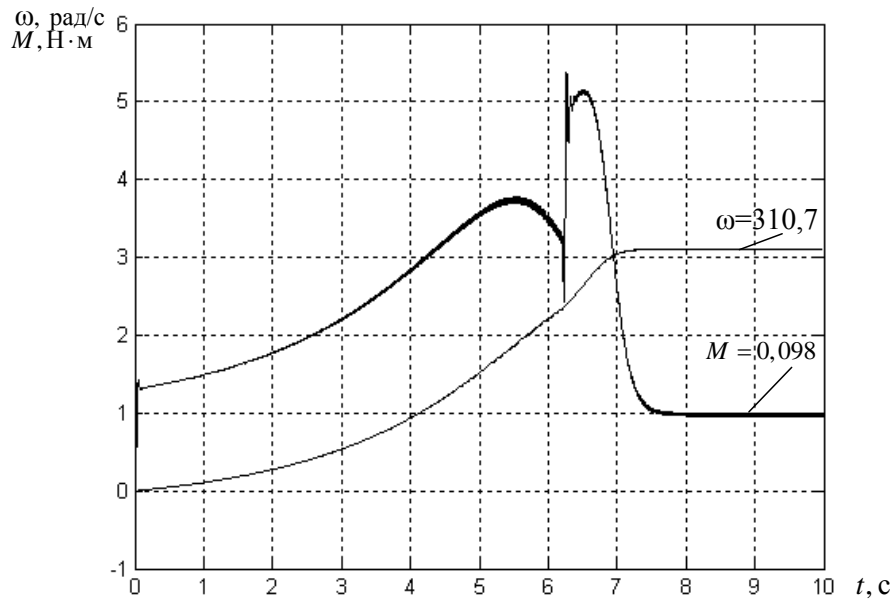


Рисунок 2.22 – Переходные процессы при пуске двигателя под нагрузкой

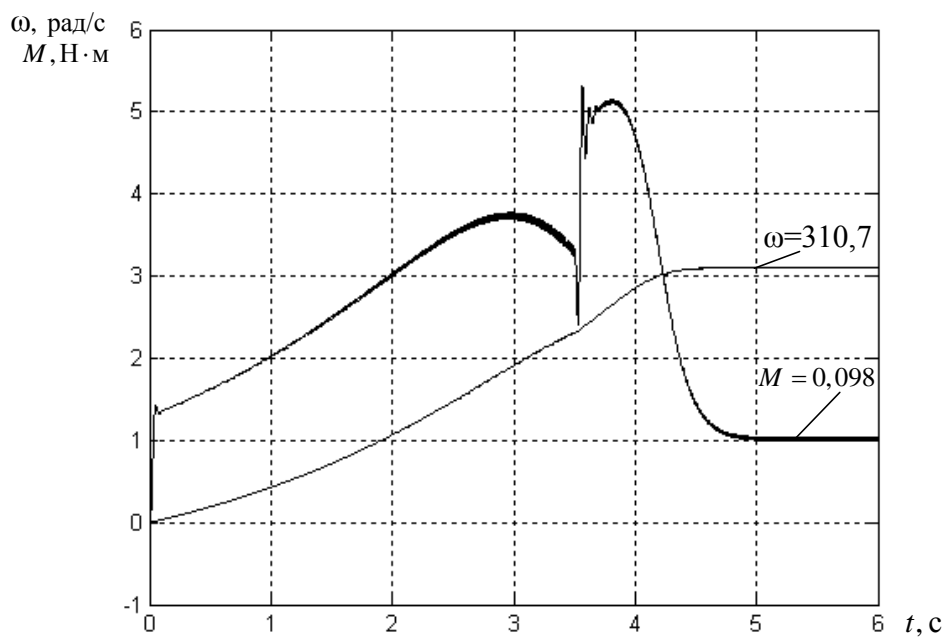


Рисунок 2.23– Переходные процессы при пуске двигателя при вентиляторной нагрузке

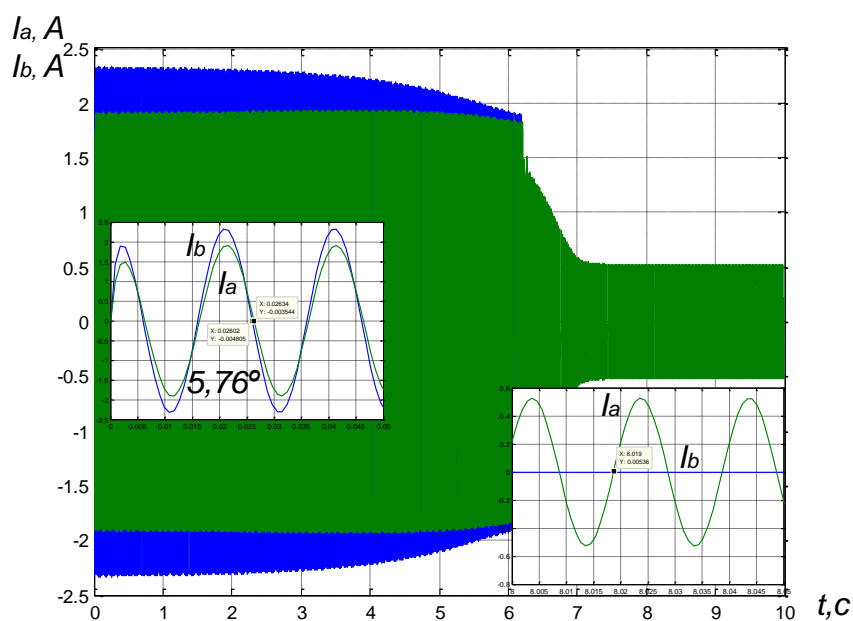


Рисунок 2.24 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя под нагрузкой

На рисунках 2.25 – 2.26 изображены механические характеристики двигателя с пусковым сопротивлением. Как и двигатель с пусковым конденсатором, двигатель с пусковым сопротивлением создает пусковой момент за счет наличия пусковых элементов в пусковой обмотке. Пусковой момент рабочей обмотки равен нулю.

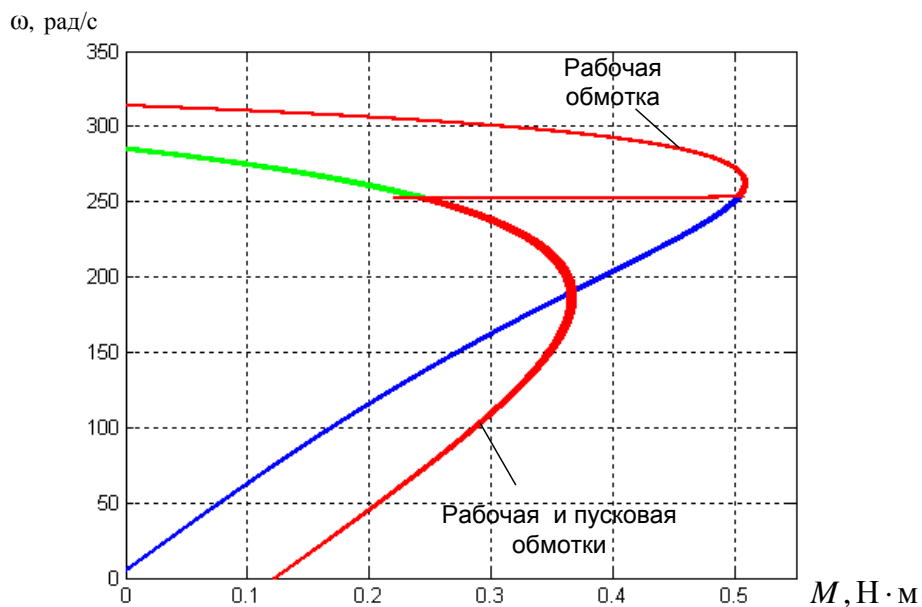


Рисунок 2.25 – Статические механические характеристики двигателя

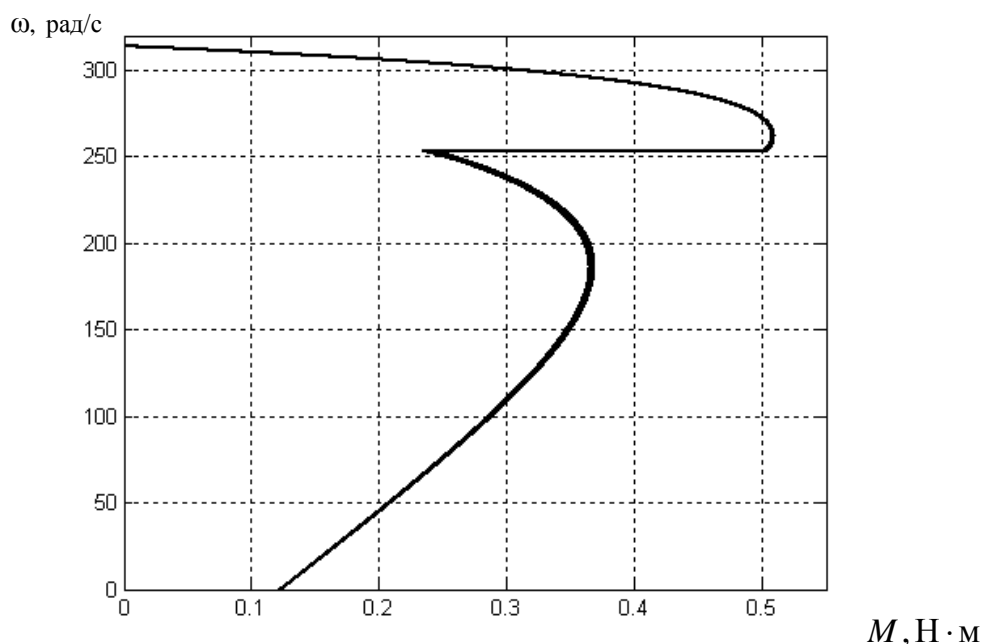


Рисунок 2.26 – Результирующая механическая характеристика двигателя

При работе двигателя только с одной рабочей фазой создаваемый электромагнитный момент, как правило, больше, чем при подключении обеих фаз (рис. 2.25).

## 2.7. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя при включении в однофазную сеть

В конденсаторных двигателях мощностью свыше 50 Вт, когда позволяют габариты статора, целесообразно применять трехфазные обмотки, включаемые в однофазную сеть. Схемы включения могут быть с постоянно включенным рабочим конденсатором  $C_p$  и включаемым на время пуска пусковым конденсатором  $C_n$  (рис. 2.27). Данные схемы применяются в тех случаях, когда трехфазная обмотка соединена в звезду (рис. 2.27, а) или в треугольник (рис. 2.27, б) внутри машины. Направление вращения ротора зависит от того, к какой обмотке подключен конденсатор. Приведенные схемы обеспечивают значения мощности до 75% от номинальной мощности трехфазной машины.

Для схемы на рис. 2.27, а если двигатель рассчитан на фазное напряжение 127 В, а напряжение однофазной сети равно 220 В, то емкость конденсатора  $C = 2800 \cdot I/U = 12,72 \cdot I$  [мкФ], где  $I, U$  – номинальный фазный ток и напряжение однофазной сети.

Для схемы на рис. 2.27, б если двигатель рассчитан на фазное напряжение 220 В, и напряжение сети также равно 220 В, то емкость конденсатора  $C = 4800 \cdot I/U = 21,82 \cdot I$  [мкФ].

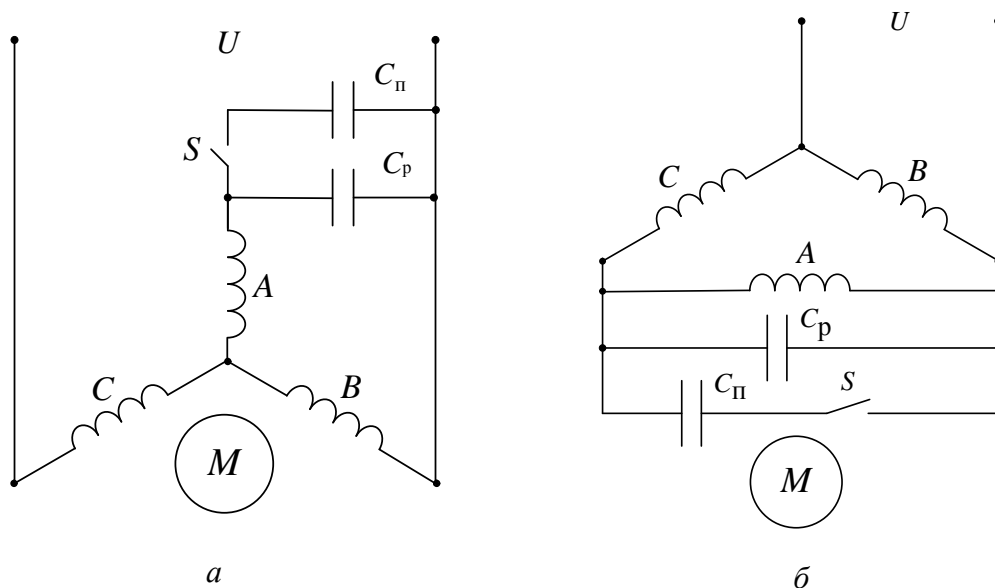


Рисунок 2.27 – Схемы включения трехфазных двигателей в однофазную сеть

Для создания кругового вращающегося поля в зазоре такой машины необходимо применение конденсаторов относительно больших номинальных емкостей, но низких рабочих напряжений ( $\approx 1,2 U_n$ ).

Если в трехфазном двигателе выведены все шесть концов обмотки статора, следует отдать предпочтение схеме на рис. 2.28.

Схема однофазного включения трехфазного двигателя может быть исследована методом симметричных составляющих для двухфазных машин. У двухфазной машины (рис. 2.28), полученной из трехфазной, коэффициент трансформации определяется однозначно:

$$k = \frac{\omega_{\text{эВ}}}{\omega_{\text{эА}}} = \frac{1}{\sqrt{3}}, \quad (2.44)$$

где  $\omega_{\text{эВ}}$  и  $\omega_{\text{эА}}$  – эффективные числа витков обмоток  $A$  и  $B$  производной двухфазной машины.

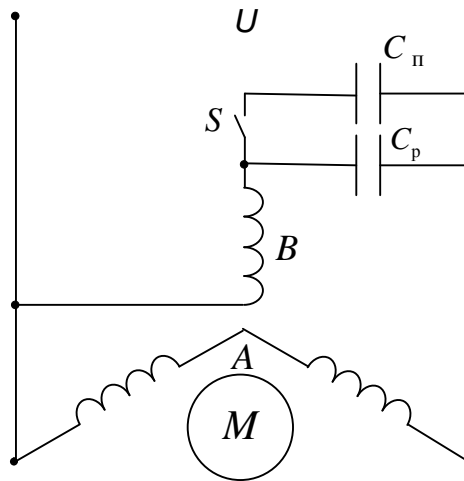


Рисунок 2.28 – Схема однофазного включения трехфазного двигателя

Параметры схемы замещения для фазы  $A$ :

- $r_{SA} = 2 \cdot r_S$  – активное сопротивление фазы  $A$ ;
- $x_{SA} = 2 \cdot x_S$  – индуктивное сопротивление фазы  $A$ ;
- $r_{RA} = k_{12}^2 \cdot r_R = 2 \cdot r_R$  – активное сопротивление ротора, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы  $A$ );
- $x_{RA} = 2 \cdot x_R$  – индуктивное сопротивление ротора, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы  $A$ );
- $x_{mA} = \frac{1}{k^2} \cdot x_m = 3 \cdot x_m$  – индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре, приведенное к числу фаз и витков статора фазы  $A$ .

Параметры схемы замещения для фазы  $B$ :

- $r_{SB} = r_S$  и  $x_{SB} = x_S$  – активное и индуктивное сопротивления фазы  $B$ ;
- $r_{RB} = k^2 \cdot r_{RA} = \frac{1}{3} \cdot r_{RA} = \frac{2}{3} \cdot r_R$  – активное сопротивление ротора фазы  $B$ ;
- $x_{RB} = k^2 \cdot x_{RA} = \frac{1}{3} \cdot x_{RA} = \frac{2}{3} \cdot x_R$  – индуктивное сопротивление ротора фазы  $B$ ;
- $x_{mB} = k^2 \cdot x_{mA} = \frac{1}{3} \cdot x_{mA} = x_m$  – индуктивное сопротивление фазы  $B$ , соответствующее потоку в воздушном зазоре.

Структурная схема трехфазного конденсаторного асинхронного двигателя с рабочим и пусковым конденсатором при его включении в однофазную сеть соответствует структурной схеме, представленной на рис. 2.3.

Моделирование переходных процессов при пуске трехфазного конденсаторного асинхронного двигателя проводилось для АД серии 4А71В2У3, параметры которого приведены в приложении 1 (табл. П.1.4).

Результаты моделирования переходных процессов трехфазного двигателя для однофазного включения с рабочим и пусковым конденсатором по свойствам и виду аналогичны однофазному двигателю и показаны на рис. 2.29 – 2.31. Моделирование проводилось для пуска двигателя под нагрузкой. На рис. 2.32 – 2.33 изображены механические характеристики двигателя. На рис. 2.32 изображена механическая характеристика двигателя для средних значений момента, а на рис. 2.33 – в мгновенных значениях электромагнитного момента.

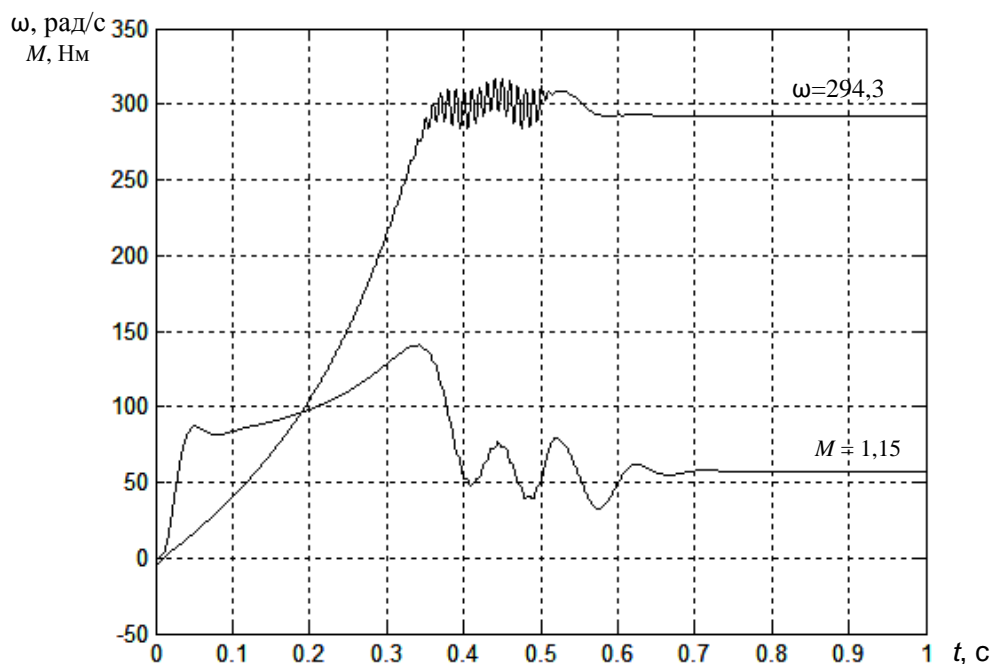


Рисунок 2.29 – Переходной процесс при пуске двигателя под нагрузкой (моделирование в пакете Simulink)

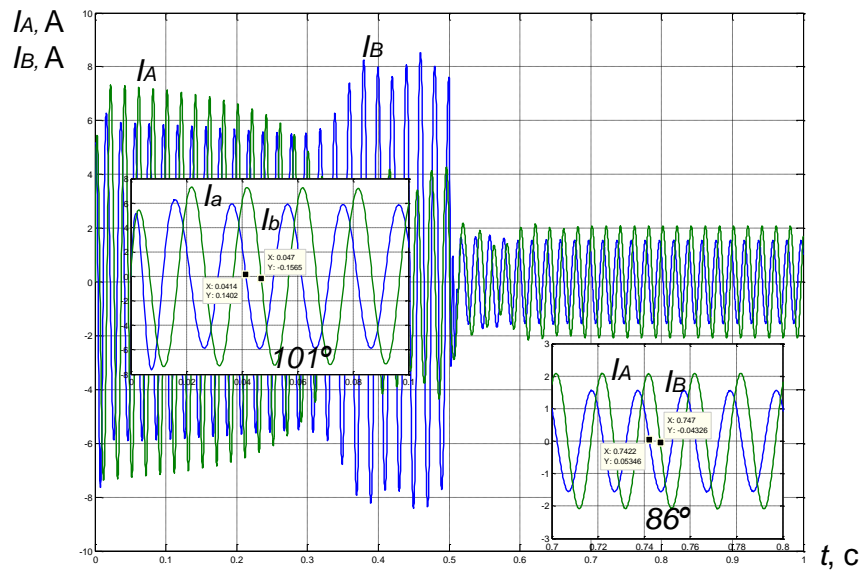


Рисунок 2.30 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя (моделирование в пакете Simulink)

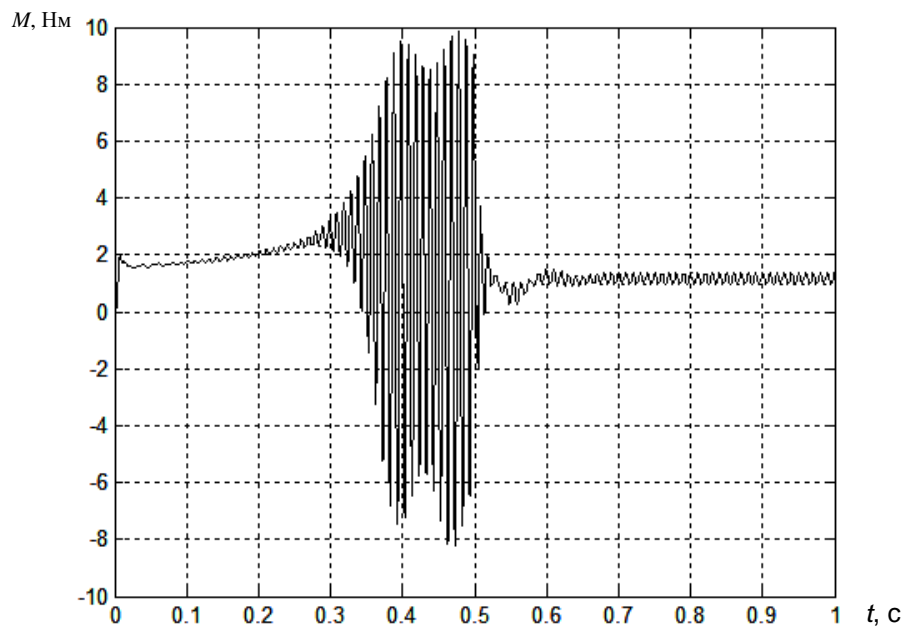


Рисунок 2.31 – Мгновенные значения электромагнитного момента при пуске (моделирование в пакете Simulink)

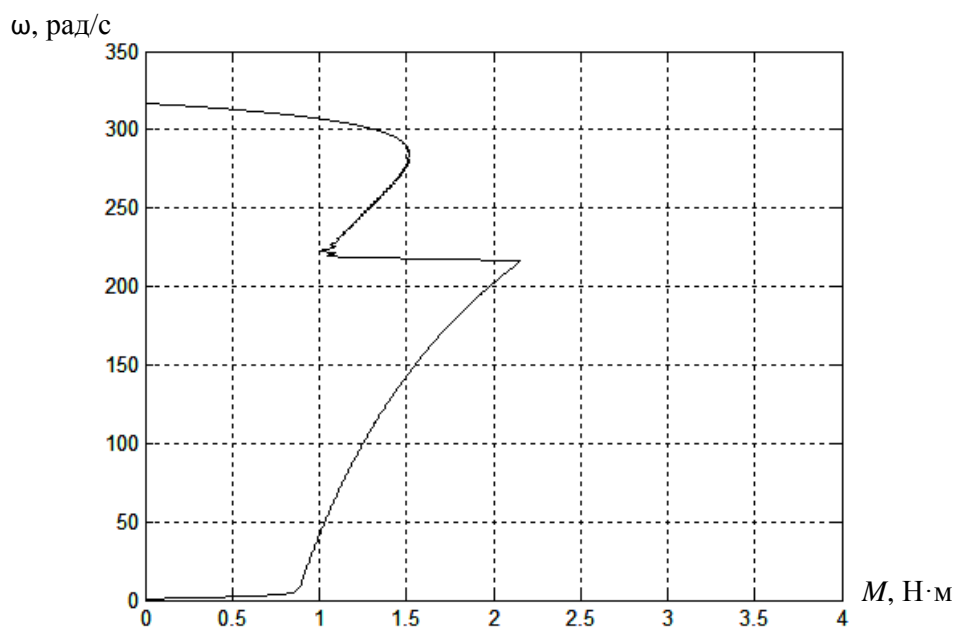


Рисунок 2.32 – Механическая характеристика двигателя (моделирование в пакете Simulink)

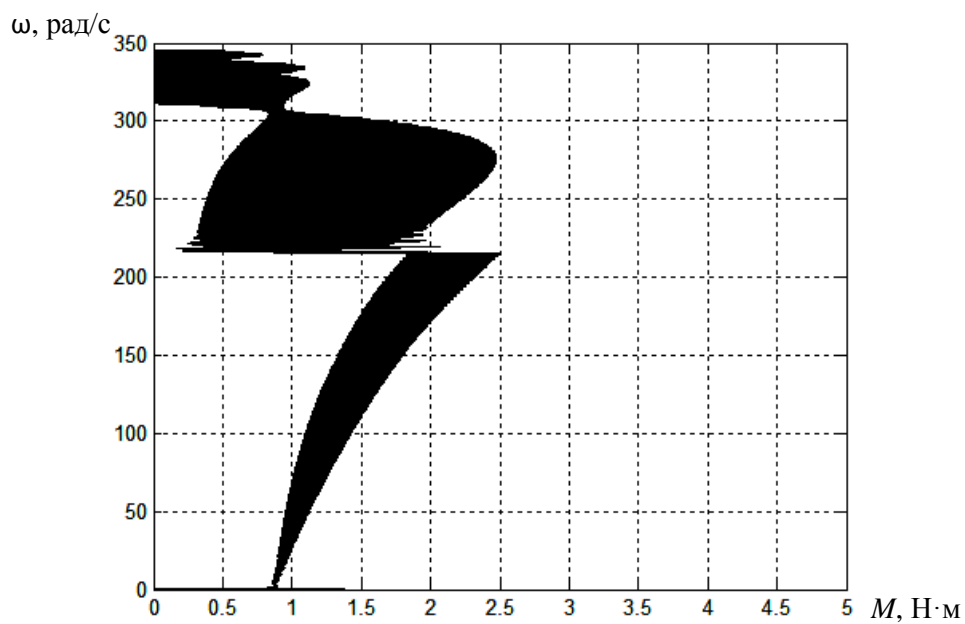


Рисунок 2.33 – Механическая характеристика двигателя в мгновенных значениях электромагнитного момента (моделирование в пакете Simulink)

Библиотека асинхронных машин пакета Sim Power System содержит модели трехфазных АД. Математическая модель двигателя состоит из двух частей: электромагнитной и электромеханической. Электромагнитная часть модели описывается системой дифференциальных уравнений во вращающейся системе координат.

Моделирование переходных процессов при пуске трехфазного конденсаторного асинхронного двигателя в пакете Sim Power System выполнялось для схемы, приведенной на рис. 2.27, а. Виртуальная модель двигателя 4A71B2Y3 приведена на рис. 2.34. В приведенной модели ключ Ideal Switch 1 предназначен для отключения пускового конденсатора после разгона двигателя.

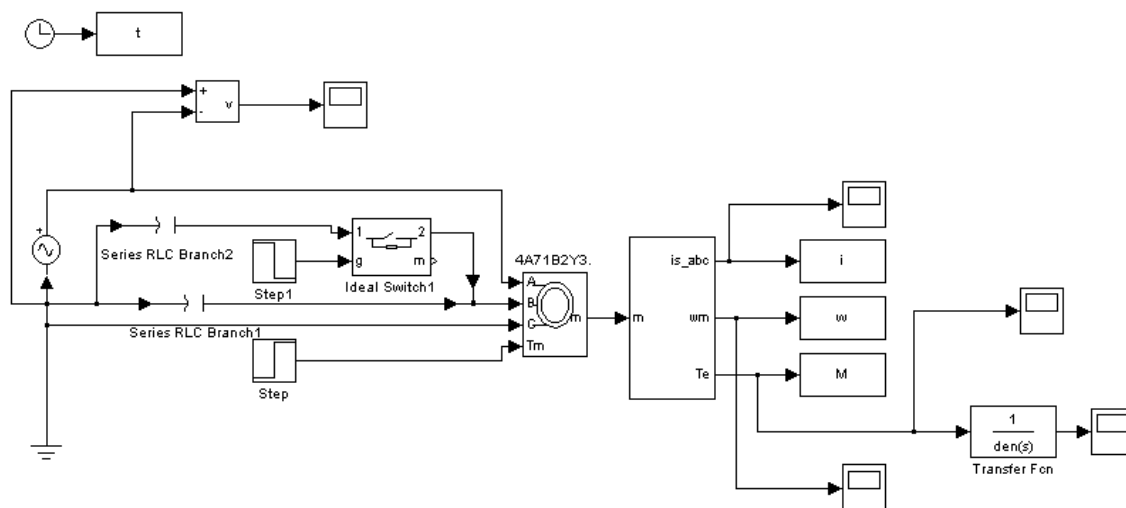


Рисунок 2.34 – Виртуальная модель асинхронного двигателя 4A71B2Y3 при включении в однофазную сеть

Окно настройки параметров модели двигателя приведено на рис. 2.35. Моделирование проводилось для пуска двигателя под нагрузкой.

Результаты моделирования переходных процессов трехфазного двигателя для однофазного включения с рабочим и пусковым конденсатором в пакете Sim Power System по свойствам и виду аналогичны однофазному двигателю и показаны на рис. 2.36 – 2.38.

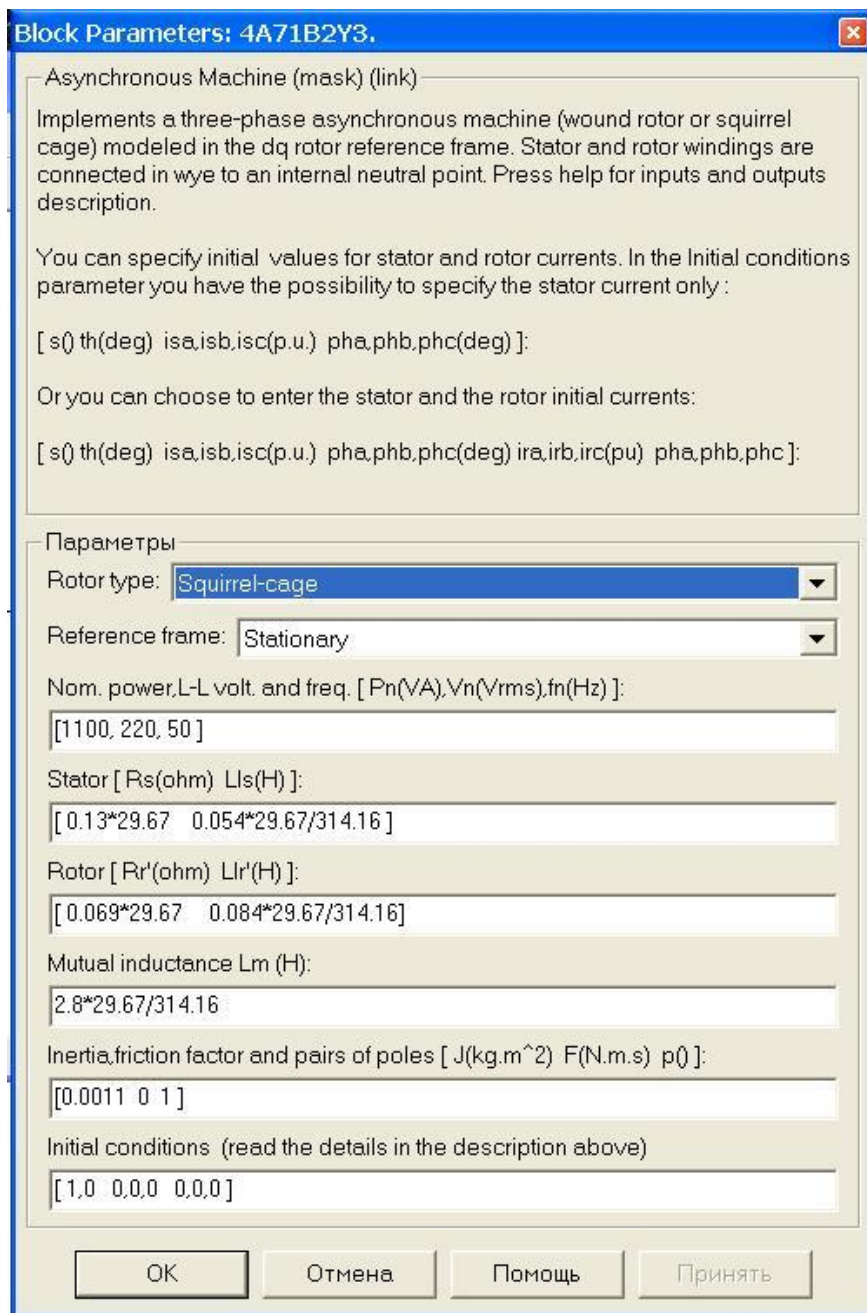


Рисунок 2.35 – Окно настройки параметров модели

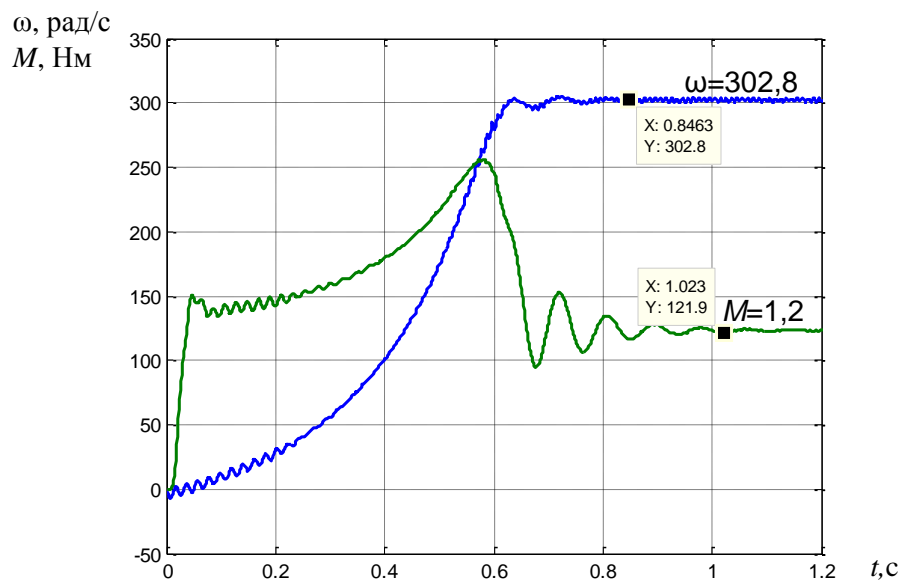


Рисунок 2.36 – Переходной процесс при пуске двигателя под нагрузкой (моделирование в пакете Sim Power System)

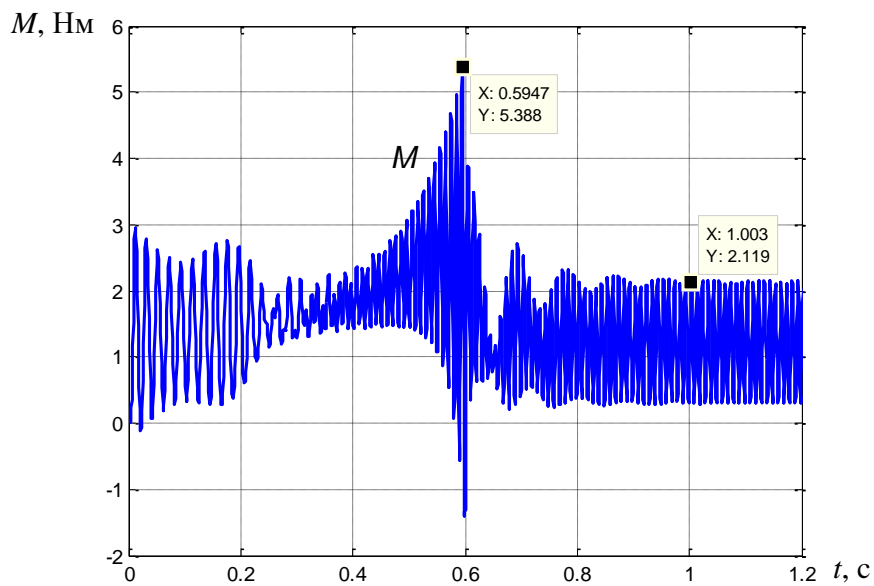


Рисунок 2.37 – Мгновенные значения электромагнитного момента при пуске (моделирование в пакете Sim Power System)

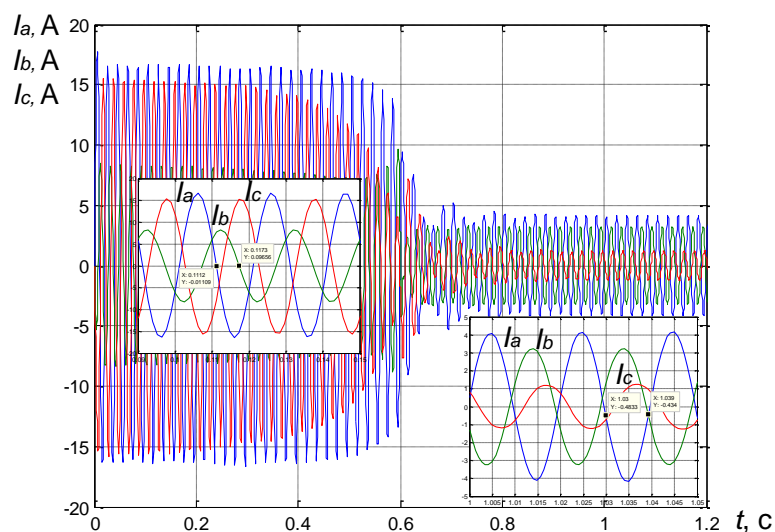


Рисунок 2.38 – Токи в обмотках статора при пуске двигателя (моделирование в пакете Sim Power System)

### Контрольные вопросы

1. Дайте классификацию однофазных асинхронных двигателей.
2. Перечислите методы исследования однофазных асинхронных двигателей.
3. Какие системы координат применяются при исследовании однофазных асинхронных двигателей?
4. Какие уравнения являются основой математического описания асинхронной машины?
5. Взаимодействием каких величин образуется электромагнитный момент на валу асинхронного двигателя?
6. Объясните принцип работы конденсаторного однофазного асинхронного двигателя.
7. Перечислите виды конденсаторных однофазных асинхронных двигателей.
8. Назовите особенности однофазного асинхронного двигателя с пусковым конденсатором.
9. Объясните принцип работы асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки.
10. Назовите основные схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

## *Раздел 3*

### **Коллекторные микродвигатели**

#### **3.1. Коллекторные микродвигатели постоянного тока**

##### *3.1.1. Принцип работы коллекторных микродвигателей постоянного тока*

Коллекторные электродвигатели постоянного тока по сравнению с асинхронными двигателями имеют следующие преимущества:

- высокая скорость вращения (более 3000 об/мин);
- возможность плавного и экономичного регулирования скорости вращения путем изменения величины питающего напряжения;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- большее значение пускового и рабочего момента.

Принцип работы коллекторных двигателей постоянного тока (ДПТ) подробно рассмотрен в различной литературе. В данной главе рассмотрим только особенности микродвигателей постоянного тока, применяемых в электробытовой технике. В устройствах бытовой техники в основном используются двигатели малой мощности с независимым возбуждением и с постоянными магнитами. По эксплуатационным свойствам эти двигатели аналогичны. Мощность этих двигателей обычно не превышает нескольких десятков ватт. Отсутствие обмотки возбуждения упрощает конструкцию двигателей и способствует повышению их КПД и надежности.

Двигатели с постоянными магнитами имеют недостатки, ограничивающие в ряде случаев их применение:

- при мощности более 40–50 Вт их габаритные размеры и масса оказываются больше, чем у двигателей с электромагнитным возбуждением;
- высокая стоимость магнитотвердых материалов для изготовления постоянных магнитов полюсов.

Принципиальная схема двигателя с постоянными магнитами показана на рис. 3.1. Уравнение электромеханической характеристики коллекторного двигателя:

$$\omega = \frac{U_{\text{я}} - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{K\Phi}, \quad (3.1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения якоря;  $U_{\text{я}}$  – напряжение на обмотке якоря;  $I_{\text{я}}$  – ток обмотки якоря;  $R_{\text{я}}$  – сопротивление обмотки якоря;  $K$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $\Phi$  – магнитный поток обмотки возбуждения (постоянных магнитов).

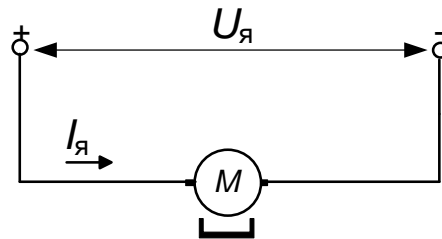


Рисунок 3.1 – Схема включения коллекторного двигателя постоянного тока с постоянными магнитами

Как следует из выражения (3.1) регулирование скорости вращения двигателя с постоянными магнитами связано с изменением величины подводимого к обмотке якоря напряжения, введения в цепь обмотки добавочного сопротивления либо шунтирования обмотки якоря.

### 3.1.2. Математическая модель коллекторного микродвигателя постоянного тока

Система уравнений, описывающая процессы в электродвигателе, в операторной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} U_{\text{я}}(p) &= K\Phi\omega(p) + R_{\text{я}}I_{\text{я}}(p) + L_{\text{я}}pI_{\text{я}}(p) \\ M(p) &= K\Phi I_{\text{я}}(p) \\ M(p) - M_{\text{с}}(p) &= Jp\omega(p) \end{aligned}, \quad (3.2)$$

где  $L_{\text{я}}$  – индуктивность обмотки якоря;  $M(p)$  – момент двигателя;  $M_{\text{с}}(p)$  – момент статической нагрузки;  $J$  – приведенный момент инерции электропривода.

Структурная схема коллекторного двигателя постоянного тока приведена на рис. 3.2, где  $T_{\text{э}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}}$  – электромагнитная постоянная времени,  $K_{\text{Е}} = K\Phi_{\text{н}}$  – номинальный коэффициент ЭДС двигателя,  $K_{\text{м}}$  – коэффициент

передачи двигателя по моменту. Номинальный коэффициент ЭДС двигателя не равен коэффициенту передачи двигателя по моменту  $K_E \neq K_M$ .

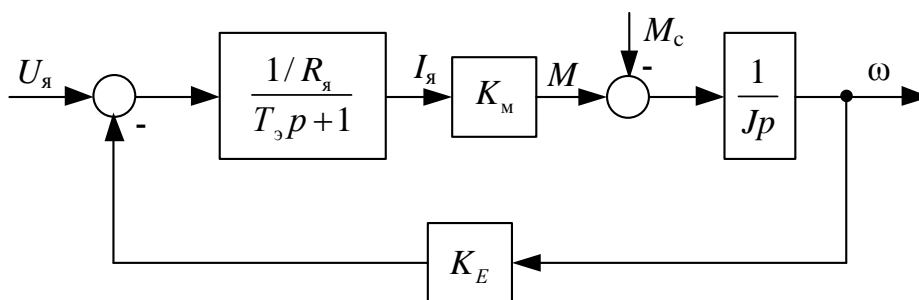


Рисунок 3.2 – Структурная схема коллекторного двигателя

На основании структурной схемы (рис. 3.2) в среде Matlab-Simulink составлена модель для изучения переходных процессов двигателя постоянного тока. Моделирование переходных процессов при пуске проводилось для двигателя с электромагнитным возбуждением [10], параметры которого приведены в приложении 1 (табл. П.1.5).

Графики переходных процессов разгона двигателя до скорости холостого хода и наброса номинальной нагрузки в пакете Simulink приведены на рис. 3.3.

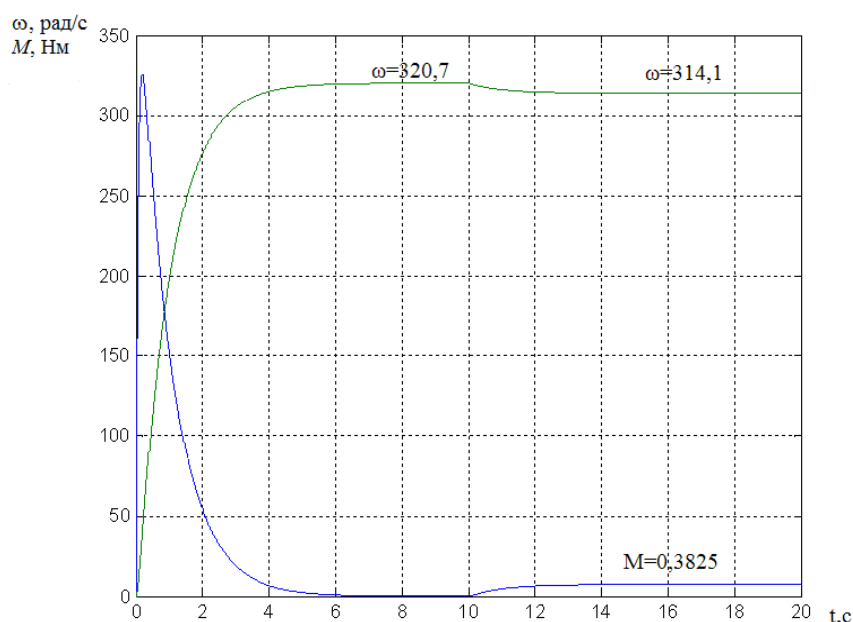


Рисунок 3.3 – Разгон двигателя до номинальной скорости (моделирование в пакете Simulink)

В среде Matlab-Sim Power System приведены модели двигателей постоянного тока. Для исследуемого двигателя виртуальная модель показана на рис. 3.4. Окно настройки параметров модели ДПТ показано на рис. 3.5.

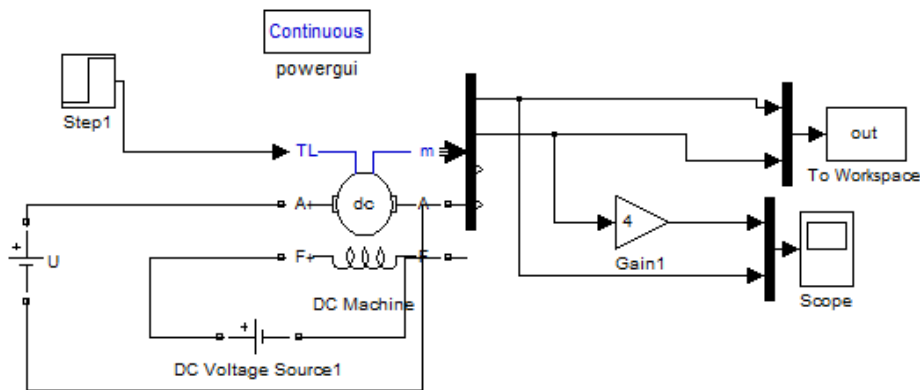


Рисунок 3.4 – Виртуальная модель двигателя постоянного тока

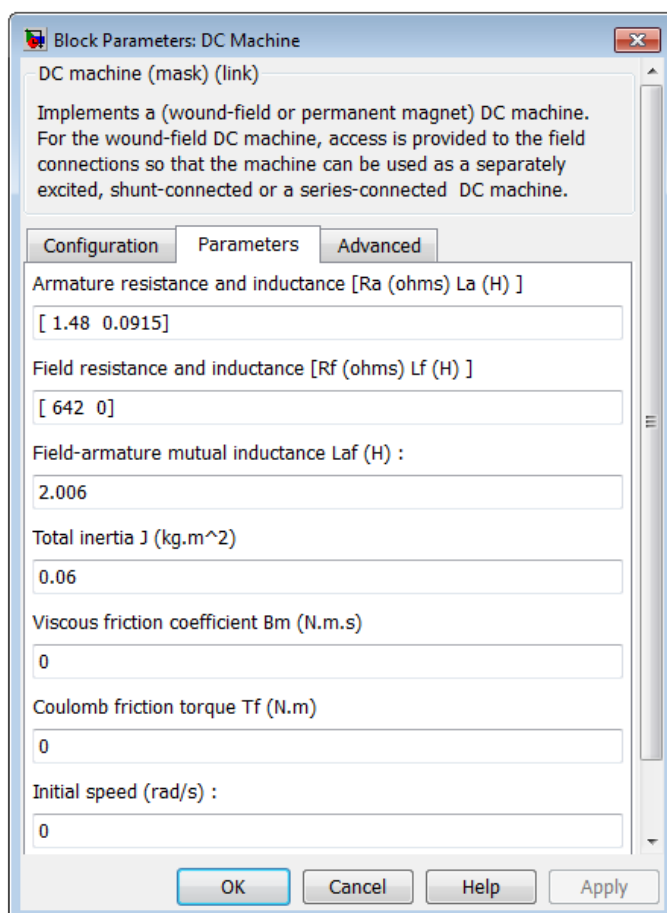


Рисунок 3.5 – Окно настройки параметров модели ДПТ

На рис. 3.6 приведены графики переходных процессов разгона двигателя до скорости холостого хода и наброса нагрузки в пакете Sim Power System.

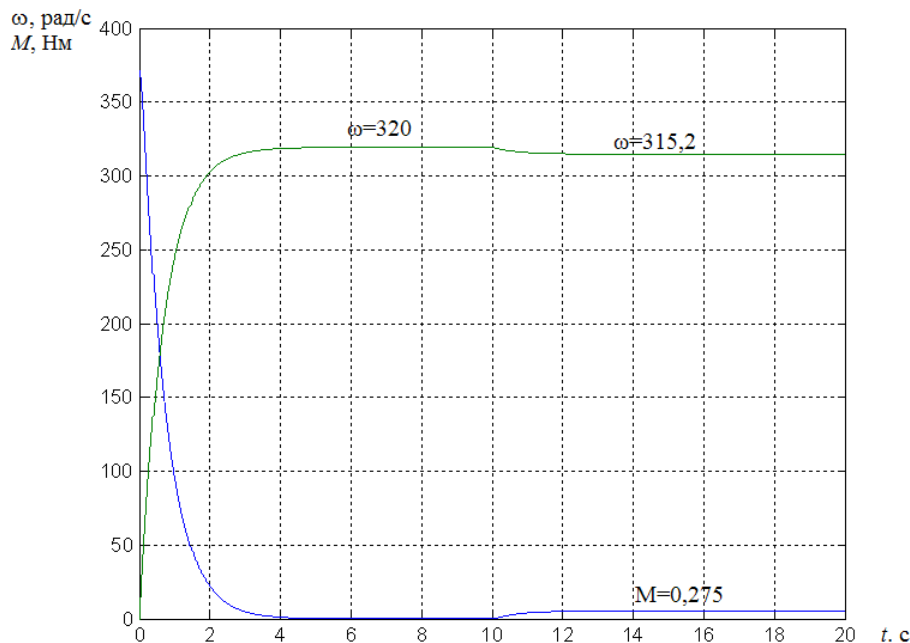


Рисунок 3.6 – Разгон двигателя до номинальной скорости (моделирование в пакете Sim Power System)

Графики переходных процессов на рис. 3.3 и рис. 3.6 не идентичны друг другу. Это объясняется тем, что в структурной схеме в пакете Simulink номинальный коэффициент ЭДС двигателя  $K_E$  отличается от коэффициента передачи по моменту  $K_M$  (табл. П.1.5). В виртуальной модели в пакете Sim Power System эти коэффициенты приняты равными друг другу. Поэтому для получения в виртуальной модели скорости, близкой к номинальному значению двигателя, нагрузка на его валу должна быть примерно на 30% меньше.

## 3.2. Коллекторные двигатели переменного тока

### 3.2.1. Принцип действия коллекторного двигателя переменного тока

Коллекторные электродвигатели переменного тока по сравнению с асинхронными двигателями имеют такие же преимущества, что и коллекторные двигатели постоянного тока:

- высокая скорость вращения при частоте питающей сети 50 Гц (3000–25000 об/мин);
- возможность плавного регулирования скорости вращения;
- широкий диапазон регулирования скорости;
- большее значение пускового момента.

Основным недостатком коллекторных двигателей переменного тока является повышенное искрение под щетками, что объясняется наведением трансформаторной ЭДС в коммутируемых секциях обмотки якоря. Вследствие этого контакт щетка–коллектор является источником значительных радиопомех. Для их подавления применяют помехоподавляющие фильтры.

Коллекторные двигатели переменного тока отличаются от двигателей постоянного тока тем, что они не имеют компенсационной обмотки и дополнительных полюсов. Магнитную систему коллекторных двигателей переменного тока выполняют шихтованной для уменьшения потерь на гистерезис и вихревые токи.

По способу создания потока возбуждения двигатели переменного тока могут быть с параллельным и последовательным возбуждением. Промышленностью, как правило, выпускаются универсальные коллекторные двигатели с последовательным включением обмотки возбуждения.

Возможность работы коллекторного двигателя последовательного возбуждения от сети переменного тока объясняется тем, что при изменении полярности подводимого напряжения изменяются направления токов в обмотке якоря и возбуждения. При этом изменение полярности полюсов статора практически совпадает с изменением направления тока в обмотке якоря. В итоге направление электромагнитного вращающего момента не изменяется.

Рассмотрим принцип работы коллекторного двигателя переменного тока последовательного возбуждения (рис. 3.7).

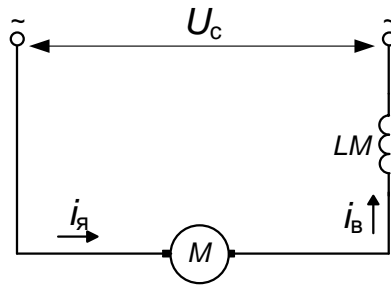


Рисунок 3.7 – Схема включения коллекторного двигателя переменного тока последовательного возбуждения

При подключении электродвигателя к сети переменного тока по последовательно включенным обмоткам возбуждения и якоря протекает ток  $i_{я}$ :

$$i_{я} = I_m \sin \omega_c t, \quad (3.3)$$

возбуждающий пульсирующий магнитный поток  $\Phi$ .

Если пренебречь потерями на гистерезис и вихревые токи, то магнитный поток возбуждения:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega_c t, \quad (3.4)$$

совпадает по фазе с током якоря  $i_{я}$  (рис. 3.8).

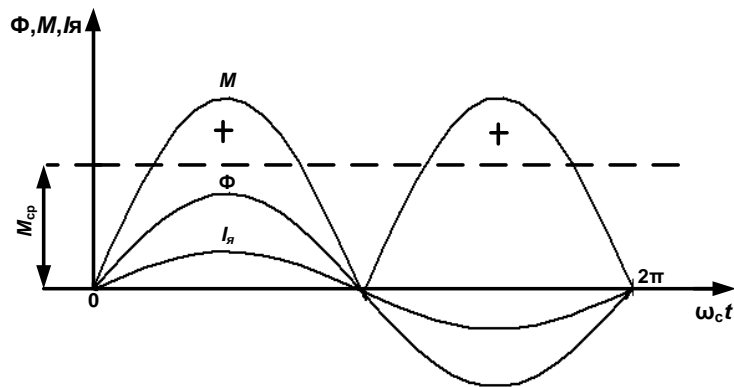


Рисунок 3.8 – Зависимость потока, вращающего момента и тока якоря двигателя с последовательным возбуждением

В результате взаимодействия магнитного потока  $\Phi$  и тока якоря  $i_{я}$  в двигателе возникает крутящий момент  $M$  и он начинает вращаться. Враща-

щающий электромагнитный момент, который развивает электродвигатель, зависит от произведения магнитного потока на ток якоря:

$$M = K\Phi i_{\text{я}}, \quad (3.5)$$

где  $K$  – конструктивный коэффициент двигателя.

Подставив в выражение (3.5) значения (3.3) и (3.4) и выполнив преобразования получим:

$$M = \frac{1}{2} K\Phi_m I_m - \frac{1}{2} K\Phi_m I_m \cos 2\omega_c t = M_{\text{пост}} + M_{\text{пер}}. \quad (3.6)$$

Вращающий момент, развиваемый электродвигателем с последовательным возбуждением, в любой момент времени будет положительным. Поэтому средний вращающий момент  $M_{\text{ср}} = M_{\text{пост}}$ , развиваемый электродвигателем при последовательном возбуждении, выше, чем в случае параллельного возбуждения.

Наличие потерь в стали приводит к возникновению отставания магнитного потока от тока якоря (возбуждения) и, следовательно, уменьшению среднего значения момента. Если магнитный поток возбуждения и ток якоря совпадают по фазе, (имеют одинаковое направление) электродвигатель развивает положительный вращательный момент, а если не совпадают (имеют противоположное направление) – отрицательный, который является тормозным. Результирующий вращательный момент равняется некоторой средней величине:

$$M_{\text{ср}} = M_{\text{пост}} = \frac{1}{2} K\Phi_m I_m \cos \gamma, \quad (3.7)$$

где  $\gamma$  – угол сдвига фаз между током якоря и магнитным потоком.

### ***3.2.2. Математическая модель коллекторного двигателя переменного тока***

Анализ динамических свойств коллекторного двигателя будем производить с учётом влияния вихревых токов, наводящихся в полюсах и станине при быстрых изменениях потока. В первом приближении влияние вихревых токов в двигателе может быть учтено добавлением в схему замещения короткозамкнутой обмотки с числом витков  $W_{\text{вт}}$  (рис. 3.9).

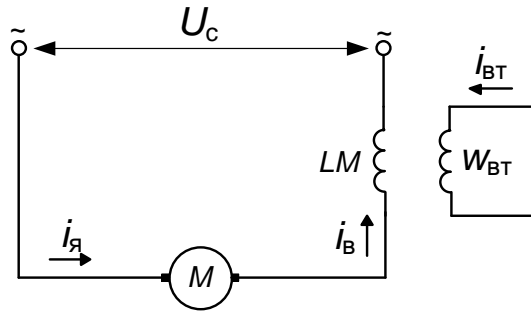


Рисунок 3.9 – Схема замещения коллекторного двигателя

С учетом данной фиктивной обмотки математическая модель, описывающая преобразование энергии в коллекторном двигателе будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 = i_{\text{BT}} R_{\text{BT}} + W_{\text{BT}} \frac{d\Phi}{dt} \\ U_{\text{я}} = E + i_{\text{я}} R_{\text{я}\Sigma} + L_{\text{я}\Sigma} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + W_{\text{B}} \frac{d\Phi}{dt} \\ E = K\Phi\omega \\ M - M_{\text{c}} = J \frac{d\omega}{dt} \\ M = K\Phi I_{\text{я}} \end{array} \right. , \quad (3.8)$$

где  $i_{\text{BT}}$  – вихревой ток, А;

$R_{\text{BT}}$  – сопротивление контура, по которому протекает вихревой ток, Ом;

$R_{\text{я}\Sigma}$  – сопротивление якорной цепи, Ом;

$W_{\text{B}}$  – количество витков обмотки возбуждения;

$W_{\text{BT}}$  – количество витков фиктивной короткозамкнутой обмотки;

$U_{\text{я}}$  – напряжение якорной обмотки, В;

$E$  – эдс двигателя, В;

$L_{\text{я}\Sigma}$  – индуктивность якорной цепи, Гн;

$\omega$  – угловая скорость вращения двигателя, рад/с;

$M_{\text{c}}$  – момент статического сопротивления, Н·м.

Разделим первое уравнение системы (3.8) на  $R_{\text{BT}}$ , а второе уравнение системы (3.8) на  $R_{\text{я}\Sigma}$  и сложим их:

$$0 = i_{\text{BT}} + \frac{W_{\text{BT}}}{R_{\text{BT}}} \frac{d\Phi}{dt} . \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + i_{я} + \frac{L_{я\Sigma}}{R_{я\Sigma}} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + \frac{W_{Б}}{R_{я\Sigma}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + (i_{я} + i_{вТ}) + \frac{L_{я\Sigma}}{R_{я\Sigma}} \cdot \frac{di_{я}}{dt} + \left( \frac{W_{Б}}{R_{я\Sigma}} + \frac{W_{вТ}}{R_{вТ}} \right) \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.11)$$

Обозначим магнитный поток как

$$\Phi = K_{\Phi} (i_{я} + i_{вТ}), \quad (3.12)$$

где  $K_{\Phi} = \frac{d\Phi}{d(i_{я} + i_{вТ})}$  – коэффициент магнитного потока, определяемый по кривой намагничивания.

В результате преобразований, получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + \frac{\Phi}{K_{\Phi}} + T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + \left( \frac{W_{Б}}{R_{я\Sigma}} + \frac{W_{вТ}}{R_{вТ}} \right) \frac{d\Phi}{dt} \\ \frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + i_{я} + T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + \frac{W_{Б}}{R_{я\Sigma}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ K\Phi i_{я} = J \frac{d\omega}{dt} + M_c \end{cases}, \quad (3.13)$$

где  $T_{я}$  – постоянная времени якорной обмотки, с.

Введем эквивалентную постоянную времени контура возбуждения с

учетом вихревых токов:  $T_{в\Sigma} = \frac{K_{\Phi} W_{Б}}{R_{я\Sigma}} + \frac{K_{\Phi} W_{вТ}}{R_{вТ}} = T_{Б} + T_{вТ} \approx (1,1 \div 1,2) \cdot T_{Б}$ , где

$T_{Б} = \frac{K_{\Phi} W_{Б}}{R_{я\Sigma}}$  – постоянная времени обмотки возбуждения, с.

С учетом этого система уравнений (3.13) представлена в виде:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + \frac{\Phi}{K_{\Phi}} + T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + \frac{T_{в\Sigma}}{K_{\Phi}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ \frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + i_{я} + T_{я} \frac{di_{я}}{dt} + \frac{T_{Б}}{K_{\Phi}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ K\Phi i_{я} = J \frac{d\omega}{dt} + M_c \end{cases}. \quad (3.14)$$

По полученной системе уравнений составляем структурную алгоритмическую схему коллекторного двигателя переменного тока (рис. 3.10).

В качестве входного сигнала принимаем напряжение питания якорной цепи  $U_{я} = U_m \sin \omega_c t$ , а в качестве выходной координаты – угловую скорость вращения коллекторного двигателя  $\omega$ .

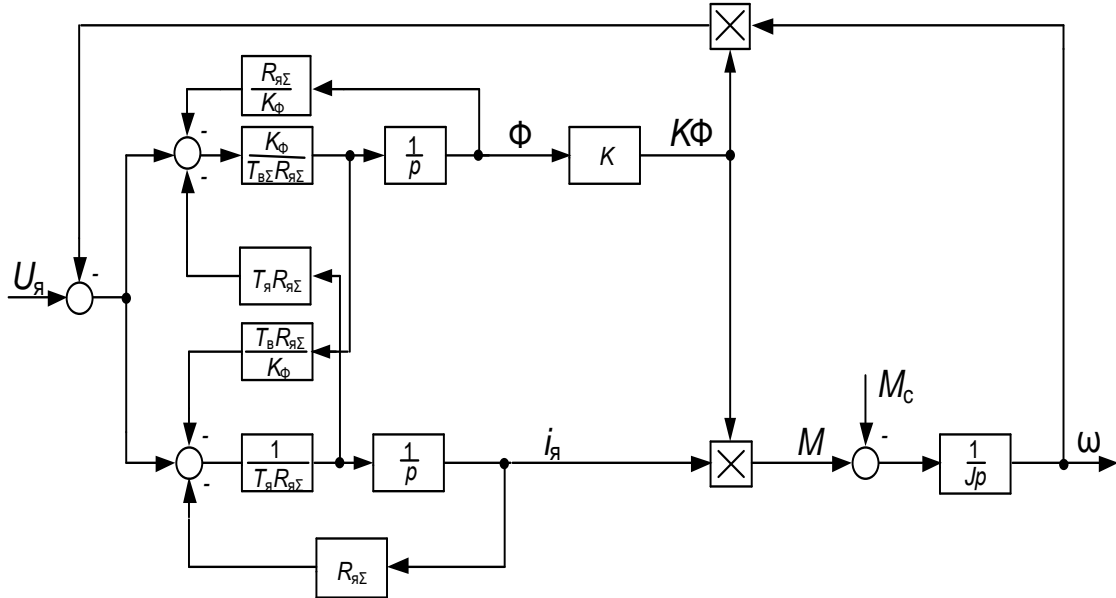


Рисунок 3.10 – Структурная схема коллекторного двигателя с учетом электромагнитных процессов

Если пренебречь электромагнитными процессами в обмотках якоря и возбуждения, т.е. допустить, что  $T_{я} \frac{di_{я}}{dt} = 0$  и  $\frac{T_{в}}{K_{\phi}} \frac{d\Phi}{dt} = 0$ , то система уравнений (3.14) будет иметь вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + \frac{\Phi}{K_{\phi}} \\ \frac{1}{R_{я\Sigma}} U_{я} = \frac{K\Phi}{R_{я\Sigma}} \omega + i_{я} \\ K\Phi i_{я} = J \frac{d\omega}{dt} + M_c \end{cases} \quad (3.15)$$

На основании системы уравнений (3.15) получим упрощенную структурную схему коллекторного двигателя (рис. 3.11).

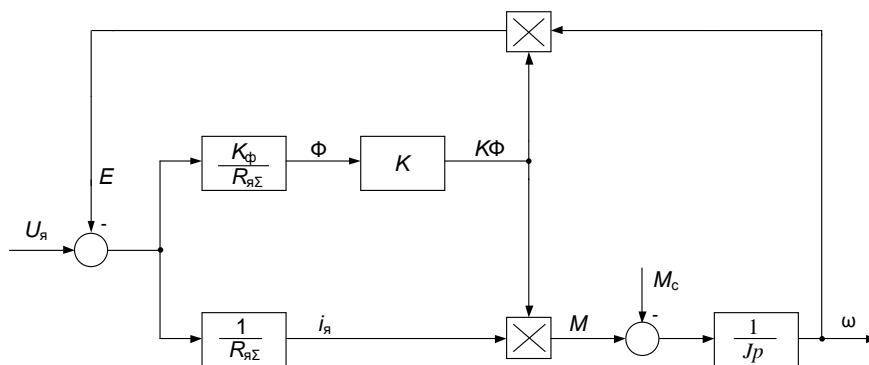


Рисунок 3.11 – Упрощенная структурная схема коллекторного двигателя

Для структурных схем, приведенных на рис. 3.10 и рис. 3.11, составлены модели универсального коллекторного двигателя типа УВ 062-ПС, параметры которого приведены в приложении 1 (табл. П.1.6).

Моделирование переходных процессов пуска двигателя при номинальном напряжении производилось при вентиляторной нагрузке. Графики переходных процессов приведены на рис. 3.12 – рис. 3.16.

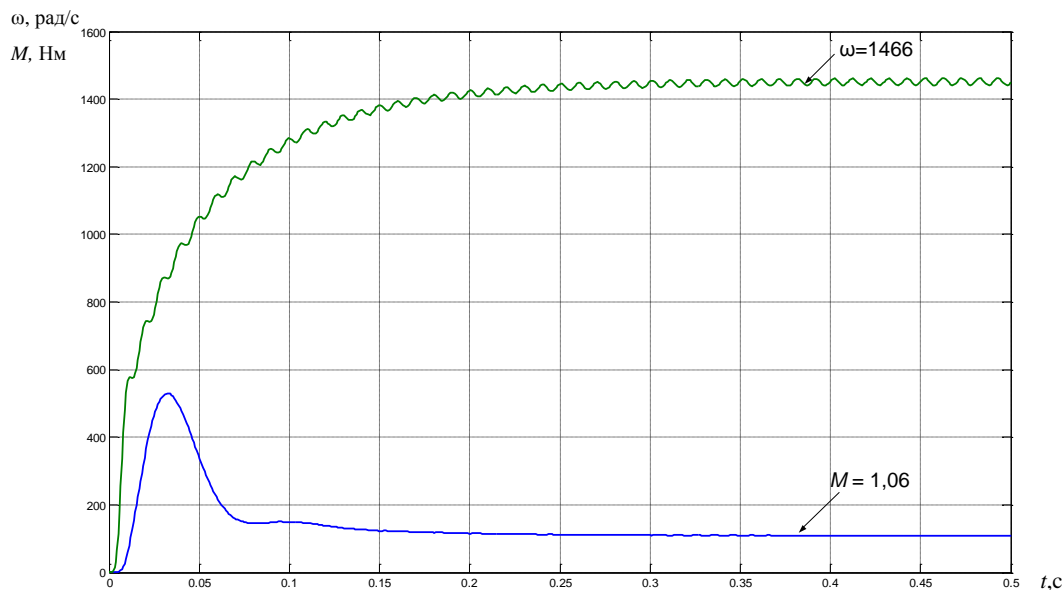


Рисунок 3.12 – Переходные процессы пуска двигателя (среднее значение момента)

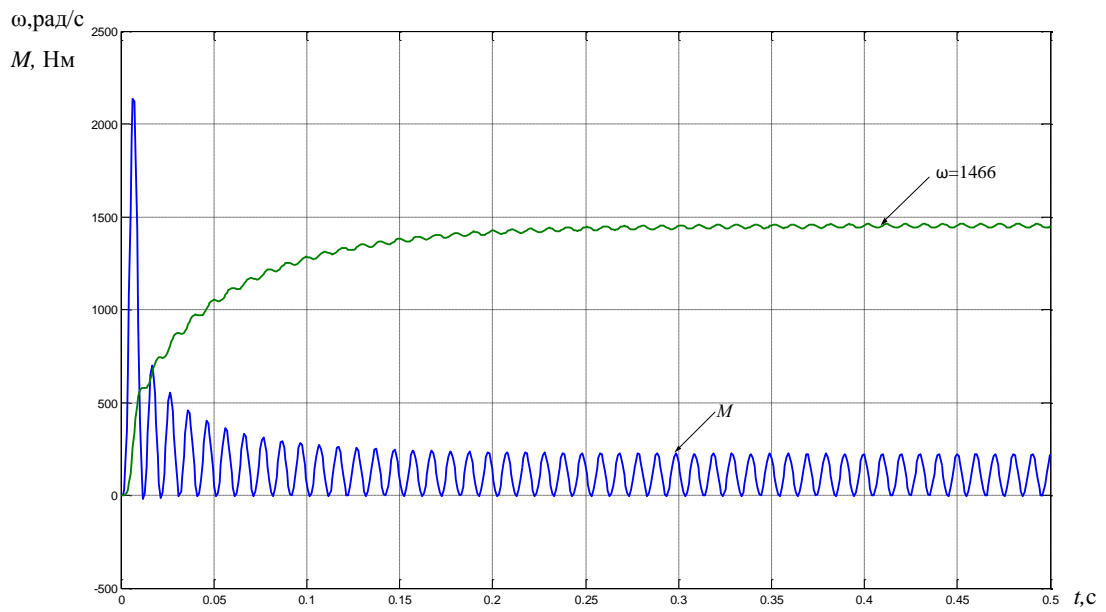


Рисунок 3.13 – Переходные процессы пуска двигателя  
(мгновенное значение момента)

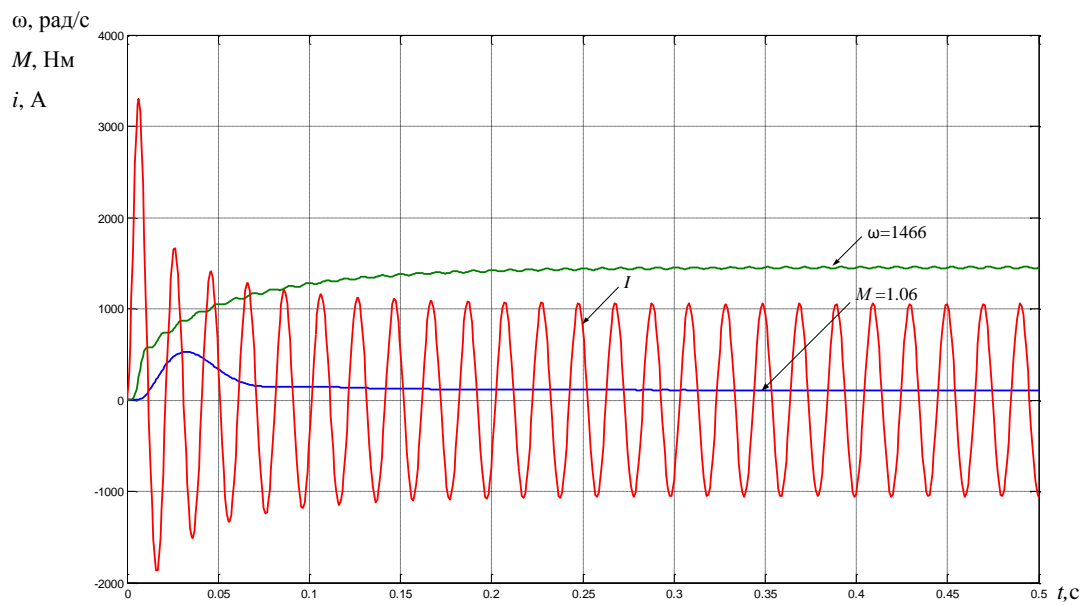


Рисунок 3.14 – Переходные процессы пуска двигателя

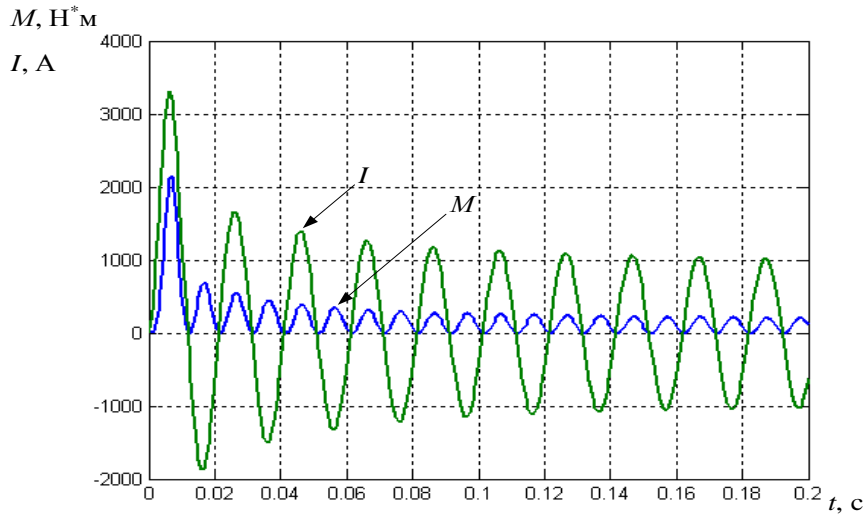


Рисунок 3.15 – Переходные процессы пуска двигателя с учетом электромагнитных переходных процессов

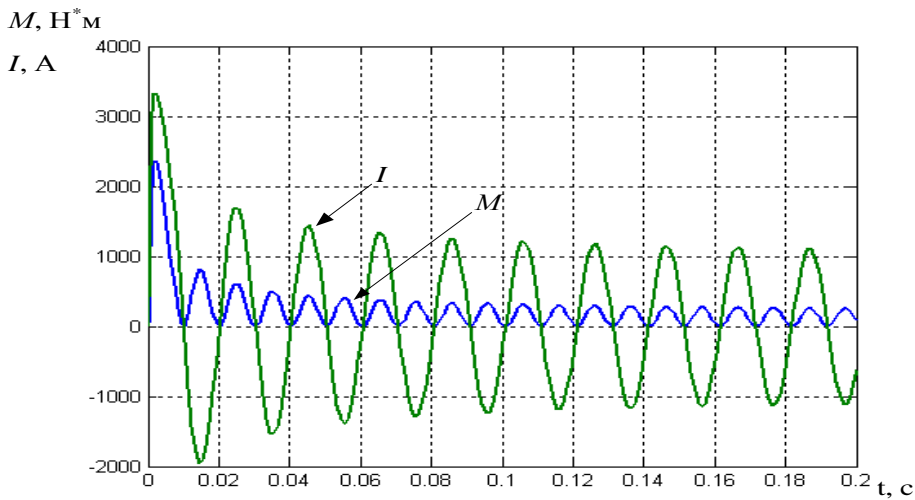


Рисунок 3.16 – Переходные процессы пуска двигателя без учета электромагнитных переходных процессов

На рис. 3.12 – рис. 3.14 приведены переходные процессы в двигателе с учетом электромагнитных переходных процессов. Аналогичные переходные процессы без учета электромагнитных переходных процессов не приведены, так как они идентичны. На рис. 3.15 приведены переходные процессы по току и моменту с учетом электромагнитных переходных процессов, а на рис. 3.16 – без учета.

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите особенности коллекторных микродвигателей постоянного тока.
2. Перечислите способы регулирования скорости вращения двигателей с постоянными магнитами.
3. Назовите особенности конструктивного исполнения коллекторных двигателей переменного тока.
4. Назовите преимущества коллекторного двигателя переменного тока с последовательным возбуждением.

## **Раздел 4**

### **Бесконтактные двигатели постоянного тока**

#### **4.1. Принцип работы бесконтактных двигателей постоянного тока**

Двигатели постоянного тока обычного исполнения с механическим коммутатором – коллектором, имеют ряд существенных недостатков, обусловленных наличием щеточно-коллекторного узла. Эти недостатки ограничивают области их применения в электробытовой технике.

В настоящее время все более широкое применение, особенно в схемах автоматики, от которых требуется высокая надежность работы, находят бесконтактные двигатели постоянного тока не с механическим (щетка – коллектор), а с полупроводниковым коммутатором. Эти двигатели, обладая практически всеми положительными свойствами обычных двигателей постоянного тока, лишены их главного недостатка – наличие щеточно-коллекторного узла.

Такие двигатели находят применение в звуко- и видеоаппаратуре, в накопителях информации, вентиляторах, приводах компакт-дисков и т.д.

Преимущества бесконтактных двигателей:

- малые габариты и масса, компактность;
- низкий уровень акустических шумов и вибраций;
- высокая надежность и большой срок службы (до 30000 час).

Бесконтактные двигатели постоянного тока (БДПТ), как правило, состоят из трех элементов (рис. 4.1):

- собственно двигателя с  $m$ -фазной обмоткой на статоре и возбужденным ротором (обычно в виде постоянного магнита). Кроме того двигатель может иметь встроенный тахогенератор, тормоз и датчик углового перемещения;
- датчика положения ротора, изготовленного в одном корпусе с двигателем и вырабатывающего сигналы управления, определяющие момент времени и последовательность коммутации обмоток двигателя. В качестве

датчиков положения применяются дискретные датчики: гальваномагнитные (датчики Холла, магнитодиоды, магниторезисторы), индукционные (вращающийся трансформатор, выполняющий одновременно и функцию датчика перемещения) и оптические. Конструктивно оптические датчики могут быть совмещены с датчиком перемещения;

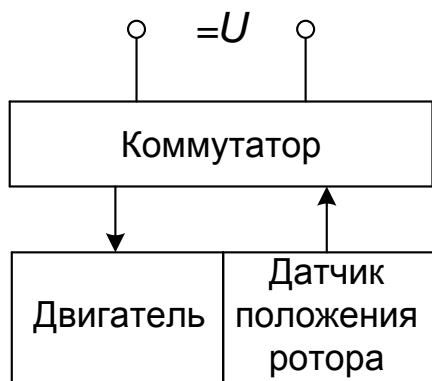


Рисунок 4.1 – Структурная схема бесконтактного двигателя постоянного тока

- бесконтактного коммутатора, осуществляющего по сигналам датчика положения ротора коммутацию токов в обмотках статора двигателя. Статический коммутатор, получая сигналы управления с датчика положения ротора, может обеспечить при вращении ротора такое же изменение токов в обмотке якоря, как и щетки с коллектором.

Принцип действия бесконтактного двигателя рассмотрим, анализируя принципиальную упрощенную схему (рис. 4.2). В эту схему входит двигатель с шихтованным из электротехнической стали статором, в пазах которого располагаются три сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$  обмотки статора  $A$ ,  $B$  и  $C$ , соединенные в звезду. Ротор двигателя выполнен в виде постоянного магнита. В одном корпусе с двигателем находится датчик положения ротора. Ротор датчика положения имеет вид сегмента, расположенного на одном валу с двигателем.

Сегмент является сигнальным элементом (СЭ) датчика положения. На статоре датчика положения располагаются чувствительные элементы (ЧЭ). Их число равно числу обмоток двигателя, а положение соответствует положению соответствующих обмоток. В качестве чувствительных элементов могут использоваться датчики ЭДС Холла, магнитодиоды и т.п. Под воздействием сигнального элемента они вырабатывают управляющие сигналы, поступающие в коммутатор.

Датчик Холла использует эффект Холла, когда при протекании электрического тока по полупроводниковой пластинке, расположенной пер-

пендикулярно магнитному полю, в пластинке наводится ЭДС, направление которой перпендикулярно, как току, так и магнитной индукции. Полярность ЭДС зависит от типа проводимости полупроводника ( $p$ - или  $n$ -типа). В вентильных двигателях широко применяют датчики Холла  $n$ -типа.

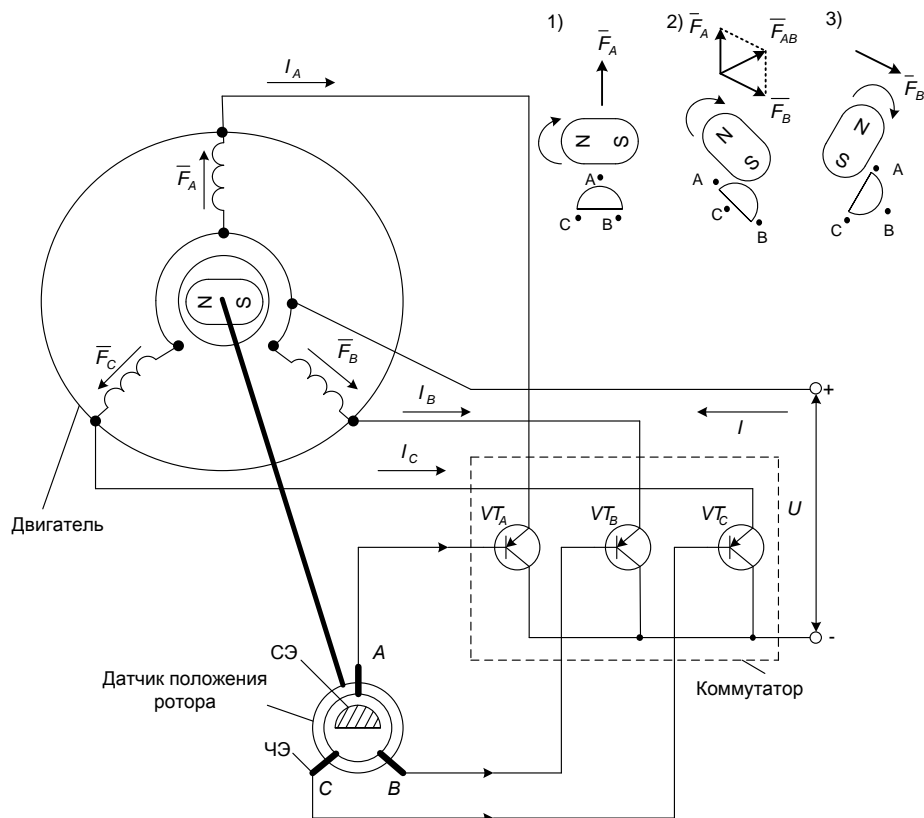


Рисунок 4.2 – Упрощенная принципиальная схема бесконтактного двигателя постоянного тока с тремя обмотками на статоре

Коммутатор в рассматриваемой схеме состоит из трех транзисторов  $VT_A$ ,  $VT_B$ ,  $VT_C$  включенных последовательно с обмотками  $A$ ,  $B$ ,  $C$  двигателя. Управляющие сигналы на транзисторы поступают с соответствующих ЧЭ датчика положения. Транзисторы работают в ключевом режиме, т.е. имеют два устойчивых состояния: «закрыт» или «открыт». Первое состояние имеет место при отсутствии сигнала с чувствительного элемента датчика положения, второе при наличии этого сигнала.

В положении 1, изображенном на рисунке 4.2, СЭ датчика положения находится около чувствительного элемента, соответствующего обмотке  $A$  статора. Это значит, что за счет управляющего сигнала (напряжения)

от этого элемента открыт транзистор  $VT_A$  и по обмотке  $A$  статора двигателя протекает ток  $I_A$ . Транзисторы  $VT_B, VT_C$  закрыты и тока в обмотках  $B$  и  $C$  нет. За счет взаимодействия МДС обмотки  $A$  статора с потоком полюсов постоянного магнита ротора возникает вращающий момент, который, воздействуя на ротор двигателя, поворачивает его по часовой стрелке. Вместе с ротором двигателя поворачивается и ротор датчика положения – его сигнальный элемент.

При повороте ротора на угол, чуть больше  $30^\circ$ , сигнальный элемент будет воздействовать сразу на два чувствительных элемента: элемент  $A$  и элемент  $B$ . Это значит, что одновременно будут открыты и транзистор  $VT_A$  и транзистор  $VT_B$ , а следовательно, будут токи и в обмотке  $A$ , и в обмотке  $B$  двигателя. За счет МДС обмотки  $B$  результирующая МДС статора  $F_{AB}$  повернется по сравнению с первоначальным положением на  $60^\circ$  (см. положение 2 в правом верхнем углу рис. 4.2). Благодаря взаимодействию этой МДС с магнитным потоком полюсов ротор двигателя будет продолжать свое вращение по часовой стрелке.

Когда угол поворота будет чуть больше  $90^\circ$ , сигнальный элемент (сектор) будет воздействовать лишь на чувствительный элемент, соответствующий обмотке  $B$ . Это значит, что транзисторы  $VT_A$  и  $VT_C$  будут закрыты. Ток будет только в обмотке  $B$ , МДС двигателя ( $F_B$ ) будет равна МДС обмотки  $B$  (см. положение 3 в правом верхнем углу рис. 4.2). Под действием этой МДС ротор двигателя будет продолжать свое вращение в прежнем направлении. Вращаясь далее, СЭ будет воздействовать сразу на чувствительные элементы, соответствующие обмоткам  $B$  и  $C$  и т.п. Таким образом, осуществляется работа бесконтактного двигателя постоянного тока при несимметричной коммутации обмоток 2–1–2–1.

При вращении ротора поток постоянного магнита наводит ЭДС в обмотке якоря, которая вместе с падением напряжения на сопротивлении обмотки уравнивает приложенное к двигателю напряжение, как и в обычной машине постоянного тока. Ротор двигателя разгоняется до такой скорости вращения, при которой вращающий момент, развиваемый двигателем, равен моменту сопротивления.

На рис. 4.2 изображен двигатель с тремя обмотками на статоре. Если увеличить число обмоток, а, следовательно, и число чувствительных элементов датчика положения и число транзисторов коммутатора до числа

секций (коллекторных пластин), которое имеет обычный двигатель постоянного тока, и считать, что транзисторы открываются и закрываются мгновенно, то по своим свойствам, характеристикам бесконтактный и обычный двигатели постоянного тока будут совершенно идентичны. Физические процессы в бесконтактном двигателе будут описываться теми же уравнениями, что и в коллекторном двигателе постоянного тока. Однако увеличение числа обмоток статора бесконтактного двигателя связано со значительными трудностями, так как реальные схемы бесконтактных двигателей значительно сложнее упрощенной принципиальной схемы (рис. 4.2), на которой изображены лишь основные функциональные элементы.

В реальной схеме для обеспечения нормальной работы датчика положения, усиления сигналов управления его чувствительных элементов, обеспечения четкой работы транзисторов коммутатора и т.п. используется большое число самых различных вспомогательных элементов, которые значительно усложняют схему двигателя, увеличивают ее размеры и стоимость. Именно поэтому при проектировании бесконтактных двигателей всегда стремятся к минимально возможному числу обмоток статора, что приводит к уменьшению числа чувствительных элементов датчика положения и числа транзисторов коммутатора. В современных бесконтактных двигателях число обмоток статора обычно не превышает четырех.

В связи с этим перемещение вектора МДС в пределах оборота носит скачкообразный характер с числом устойчивых положений, равным числу секций обмотки. При этом кривая пускового момента имеет вид, указанный на рисунке 4.3. Отношение  $M_{Nmax}/M_{Nmin}$  для различных типов БДПТ лежит в пределах 1,5–2.

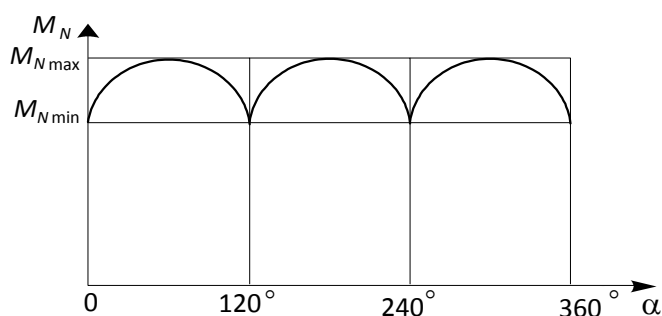


Рисунок 4.3 – Зависимость пускового момента трехфазного БДПТ от углового положения ротора

Регулирование скорости вращения двигателя с ротором в виде постоянного магнита связано с изменением величины напряжения питания и момента времени включения обмоток статора по отношению к сигналам датчика положения ротора.

Уравнение механической характеристики бесконтактного двигателя идентично уравнению коллекторного двигателя:

$$\omega = \frac{U - I R}{K \Phi}, \quad (4.1)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $U$  – напряжение на обмотке статора;  $I$  – ток обмотки статора;  $R$  – сопротивление фазы обмотки статора;  $K$  – конструктивный коэффициент двигателя;  $\Phi$  – магнитный поток.

Для регулирования скорости вращения в БДПТ применяются в основном методы широтно-импульсной модуляции напряжения питания через маломощные цепи коммутатора. Этот метод применяется для разомкнутых и замкнутых систем управления частотой вращения.

Разомкнутые системы наиболее просты, но не обеспечивают жесткой механической характеристики. Жесткость механических характеристик БДПТ значительно ниже жесткости механических характеристик коллекторных двигателей постоянного тока. Замкнутые системы управления с отрицательной обратной связью по частоте вращения обладают более жесткими механическими характеристиками. Такие системы позволяют получить точность стабилизации частоты вращения БДПТ до 0,5–1 %.

Наилучшее качество механических характеристик имеют БДПТ, построенные по системе с синхронизацией частоты вращения с частотой внешнего управляющего сигнала. В таких двигателях механическая характеристика имеет астатический характер, ее жесткость определяется только стабильностью частоты внешнего сигнала. Практическая реализация синхронизированных БДПТ позволила достигнуть точности стабилизации частоты вращения до 0,01 %. Диапазон регулирования частоты вращения этих двигателей составляет 1:1000 и более.

## 4.2. Математическая модель бесконтактного двигателя постоянного тока

Система уравнений, описывающая процессы в двигателе, имеет вид:

$$\begin{aligned} U(p) &= K_E \omega(p) + RI(p) + LpI(p) \\ M(p) - M_c(p) &= Jp \cdot \omega(p) \\ M(p) &= K_M I(p) \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $U(p)$  – напряжение питания, В;

$K_E$  – коэффициент двигателя по ЭДС, В/рад;

$\omega(p)$  – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

$R$  – сопротивление фазы обмотки статора двигателя, Ом;

$I(p)$  – ток фазы обмотки статора, А;

$L$  – индуктивность обмоток, Гн;

$M(p)$  – момент двигателя, Н·м;

$M_c(p)$  – момент статической нагрузки, Н·м;

$J$  – приведенный момент инерции электропривода, кг·м<sup>2</sup>;

$K_M$  – коэффициент двигателя по моменту, Н·м/А.

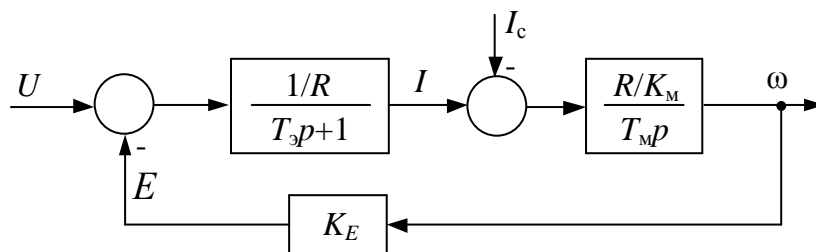


Рисунок 4.4 – Структурная схема БДПТ

Структурная схема бесконтактного двигателя идентична схеме коллекторного двигателя постоянного тока (рис. 4.4). На рисунке приняты следующие обозначения:  $I_c$  – ток статической нагрузки;  $T_s = L/R$  – электромагнитная постоянная времени;  $T_M$  – электромеханическая постоянная времени.

Номинальный ток двигателя:

$$I_H = \frac{M_H}{K_M}, \quad (4.3)$$

где  $M_n$  – номинальный момент двигателя, Н·м.

Номинальная скорость двигателя

$$\omega_n = \frac{U_n - I_n R}{K_E} = \frac{U_n}{K_E} - \frac{R}{K_E K_M} M_n, \quad (4.4)$$

где  $U_n$  – номинальное напряжение фазы обмотки статора.

Электромеханическая постоянная времени электропривода

$$T_M = \frac{J R}{K_E K_M}. \quad (4.5)$$

На основании структурной схемы (рис. 4.4) в пакете Matlab составлена модель для изучения переходных процессов двигателя типа ДБМ-105-0,4-0,75-3. Параметры двигателя приведены в приложении 1 (табл. П.1.7).

Графики переходных процессов разгона двигателя до скорости холостого хода и наброса номинальной нагрузки в пакете Simulink приведены на рис. 4.5.

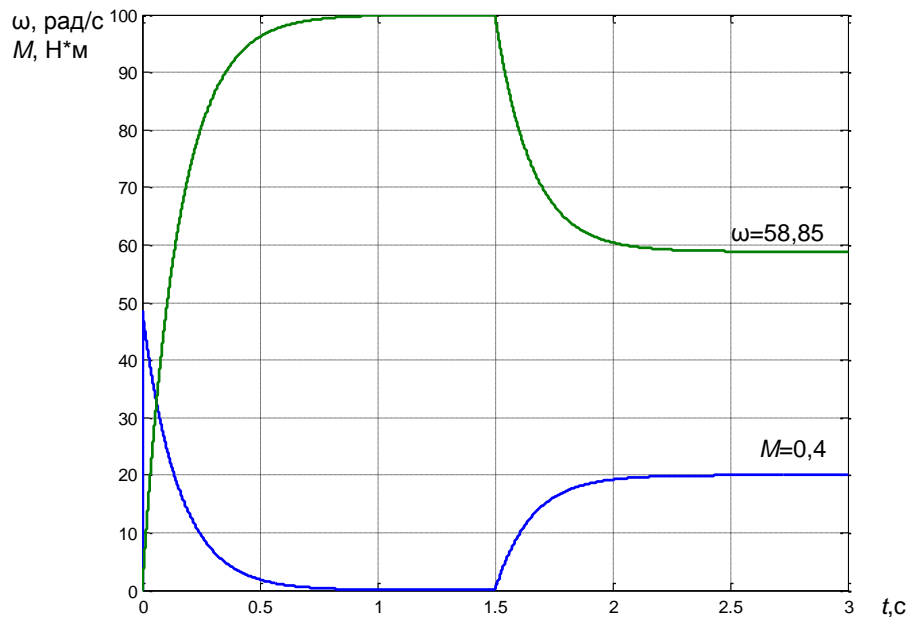


Рисунок 4.5 – Разгон двигателя до номинальной скорости (моделирование в пакете Simulink)

В библиотеке синхронных машин пакета Sim Power System имеются модели трехфазных синхронных двигателей. Одной из моделей является магнитоэлектрическая синхронная машина (Permanent Magnet Synchronous

Machine). Математическая модель машины состоит из двух частей электромагнитной и электромеханической. Математическое описание электромагнитной части модели зависит от характера распределения поля в зазоре.

При синусоидальном распределении поля электромагнитная часть машины описывается системой дифференциальных уравнений во вращающейся системе координат. Синхронные магнитоэлектрические двигатели с синусоидальным распределением магнитного поля в зазоре используются для построения вентильных двигателей.

При трапецеидальном распределении магнитного поля в зазоре электромагнитная часть машины описывается системой дифференциальных уравнений в фазовых координатах неподвижной системы координат. Синхронные магнитоэлектрические двигатели с трапецеидальным распределением магнитного поля в зазоре используются для построения бесконтактных двигателей постоянного тока.

Для бесконтактного двигателя ДБМ-105-0,4-0,75-3 виртуальная модель приведена на рис. 4.6. В модели роль коммутатора выполняет инвертор. При этом каждый транзистор инвертора включен в течение угла  $\alpha = 120^\circ$ . Блок Out In1 моделирует работу датчика положения ротора, по сигналам которого включаются транзисторы инвертора.

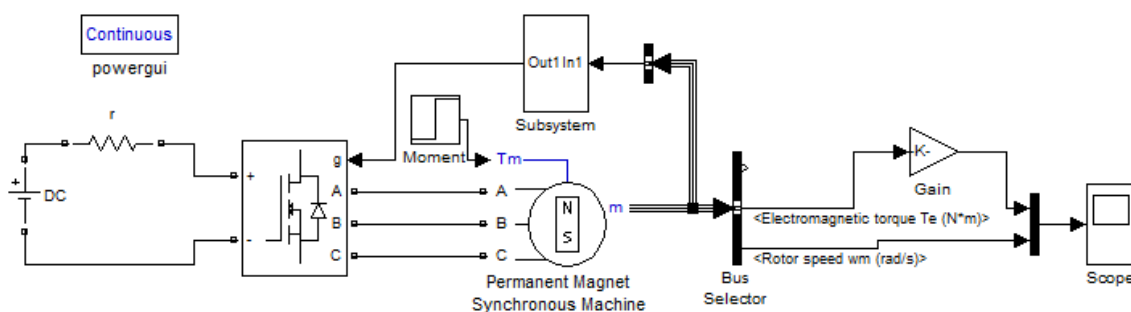


Рисунок 4.6 – Виртуальная модель бесконтактного двигателя постоянного тока

Окно настройки конфигурации модели показано на рис. 4.7, а окно настройки параметров модели двигателя – на рис. 4.8. На рис. 4.9 приведены графики переходных процессов разгона двигателя до скорости холостого хода и наброса нагрузки в пакете Sim Power System.

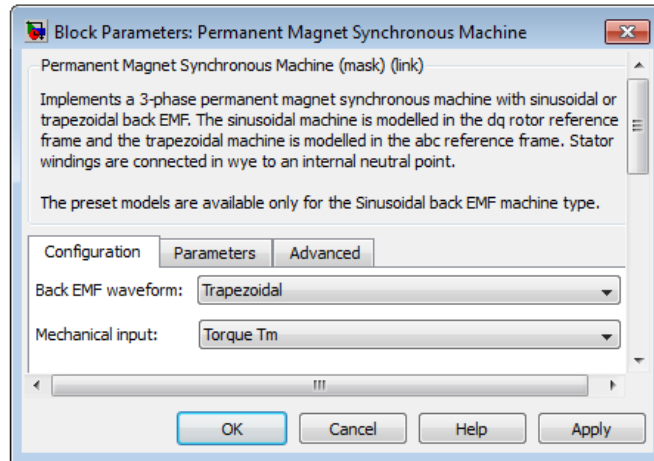


Рисунок 4.7 – Окно настройки конфигурации модели

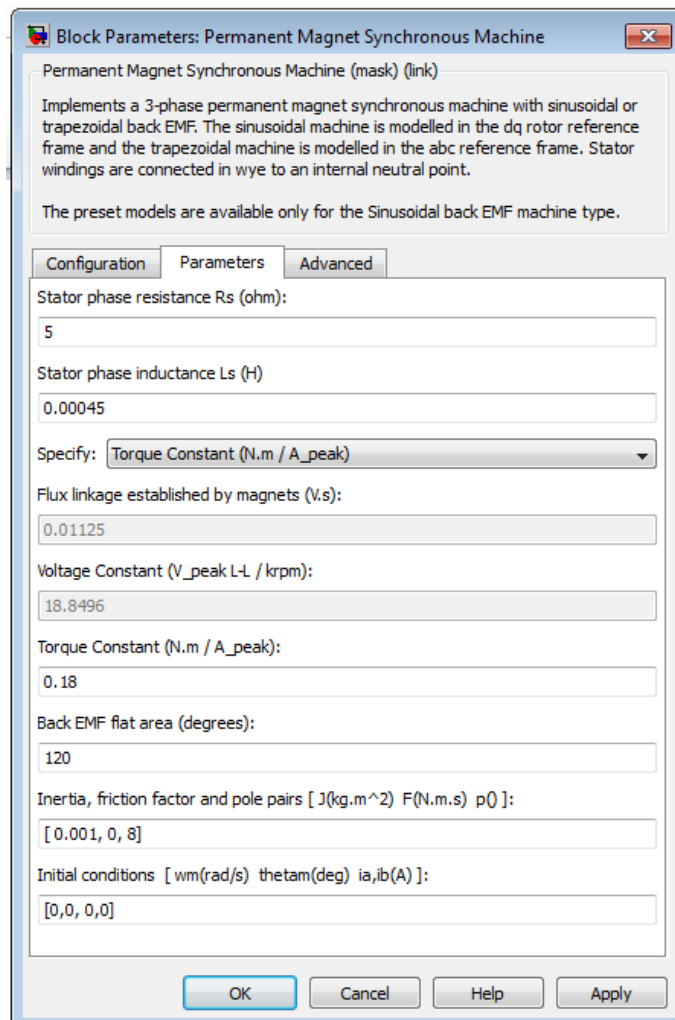


Рисунок 4.8 – Окно настройки параметров модели

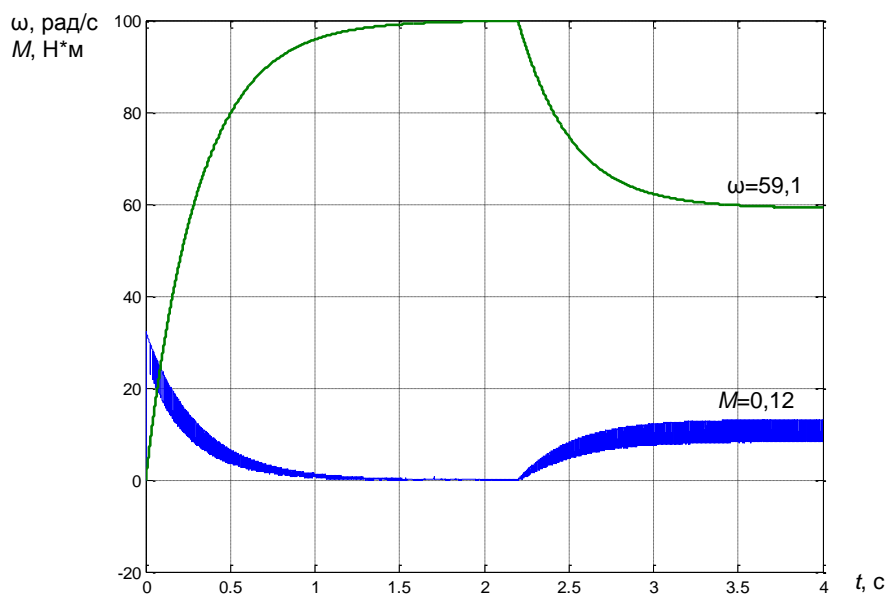


Рисунок 4.9 – Пуск двигателя на холостом ходу с набросом нагрузки (моделирование в пакете Sim Power Systems)

Графики переходных процессов на рис. 4.5 и рис. 4.9 не идентичны друг другу. Это объясняется тем, что в структурной схеме в пакете Simulink коэффициент двигателя по ЭДС  $K_E$  отличается от коэффициента двигателя по моменту  $K_M$  (табл. П.1.7). В виртуальной модели в пакете Sim Power System эти коэффициенты приняты равными друг другу. Поэтому для получения в виртуальной модели скорости, близкой к номинальному значению двигателя, нагрузка на его валу должна быть примерно 30% от номинального значения.

### Контрольные вопросы

1. Назовите преимущества бесконтактных двигателей постоянного тока по сравнению с коллекторными двигателями.
2. Из каких элементов состоит бесконтактный двигатель постоянного тока?
3. Объясните принцип работы бесконтактных двигателей постоянного тока.
4. Перечислите способы регулирования скорости вращения бесконтактных двигателей постоянного тока.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лопухина Е.М. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока / Е.М. Лопухина, Г.С. Сомихина. – Госэнергоиздат, 1961.
2. Лопухина Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчуков. – М.: Высш. шк., 2002.
3. Адаменко А.И. Несимметричные асинхронные машины / А.И. Адаменко. – К.: изд-во Академии наук УССР, 1962.
4. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств : учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика». – 2-е изд., перераб. и доп. / Ф. М. Юферов. – М. : Высш. шк., 1988.
5. Лир Э.В. Электробытовые машины и приборы : справ. / Э.В. Лир, И.В. Петко. – К.: Техника, 1990.
6. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями : учеб. пособ. / А.А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.
7. Усманходжаев Н.М. Методы регулирования скорости однофазных конденсаторных АД / Н.М. Усманходжаев. – М.: Энергия, 1980.
8. Кацман М.М. Электрические машины / М.М. Кацман. – М.: Высш. шк., 2003.
9. Хрущев В.В. Электрические машины систем автоматики : учеб. для вузов, – 2-е изд., перераб. и доп. / В. В. Хрущев. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр.отд-ние, 1985.
10. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / С.Г. Герман-Галкин. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008.
11. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов.— 2-е изд. перераб. и доп. / В. И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001.
12. Акимов Л.В. Исследование системы векторного управления частотно-регулируемым асинхронным электроприводом : метод. указ. к выполнению курсового проекта по курсу «Программное управление механизмами» для студентов специальности 7.092203 – «Электромеханические системы автоматизации и электропривод» Л. В. Акимов, Н.В. Анищенко,

Д. Г. Литвиненко, И. В. Обруч. – Х. : «Підручник НТУ «ХПІ», 2011.

13. Анищенко Н. В. Разработка математической модели и расчет переходных процессов однофазных коллекторных двигателей последовательного возбуждения / Н. В. Анищенко // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірник наукових праць. Тематичний випуск 61.– Х.: ХДПУ, 1999. – С 131-132.

14. Анищенко Н. В. Исследование статических характеристик коллекторных двигателей переменного тока / Н. В. Анищенко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2007, №24. – С 3-4.

15. Анищенко Н. В. Математическая модель однофазного конденсаторного асинхронного двигателя / Н. В. Анищенко, А.А. Астапов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2009, №44. – С. 9-13.

16. Анищенко Н. В. Моделирование асинхронного однофазного конденсаторного двигателя / Н. В. Анищенко, А.А. Астапов, А.А. Коколева // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» – Х.: НТУ «ХПІ», 2010, №28. С. 459-461.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1  
 Параметры электродвигателей

Таблица П.1.1. Параметры асинхронного двигателя с рабочим конденсатором

Параметры электродвигателя	Значения
Мощность двигателя, $P_n$ , Вт	53
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	304,74
Номинальное скольжение, $s_n$	0,03
Номинальный ток статора, $I_n$ , А	0,386
Номинальный момент, $M_n$ , Нм	0,098
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,00385
Активное сопротивление фазы А статора, $R_{s\alpha}$ , Ом	109,5
Индуктивное сопротивление фазы А статора, $X_{s\alpha}$ , Ом	43,7
Активное сопротивление фазы В статора, $R_{s\beta}$ , Ом	212
Индуктивное сопротивление фазы В статора, $X_{s\beta}$ , Ом	84,6
Приведенное активное сопротивление ротора, $R_r$ , Ом	41
Приведенное индуктивное сопротивление ротора, $X_r$ , Ом	32,9
Индуктивное сопротивление от главного потока, $X_m$ , Ом	805
Величина емкости рабочего конденсатора, $C_p$ , мкФ	2

Таблица П.1.2. Параметры асинхронного двигателя с пусковым конденсатором

Параметры электродвигателя	Значения
Мощность двигателя, $P_n$ , Вт	30
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	305,78
Номинальное скольжение, $s_n$	0,0267
Номинальный ток статора, $I_n$ , А	0,42
Номинальный момент, $M_n$ , Нм	0,098
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,00385
Активное сопротивление фазы А статора, $R_{s\alpha}$ , Ом	102,5
Индуктивное сопротивление фазы А статора, $X_{s\alpha}$ , Ом	38,8
Активное сопротивление фазы В статора, $R_{s\beta}$ , Ом	123
Индуктивное сопротивление фазы В статора, $X_{s\beta}$ , Ом	47,2
Приведенное активное сопротивление ротора, $R_r$ , Ом	48,3
Приведенное индуктивное сопротивление ротора, $X_r$ , Ом	26
Индуктивное сопротивление от главного потока, $X_m$ , Ом	1040
Величина емкости пускового конденсатора, $C_{п}$ , мкФ	8

Таблица П.1.3. Параметры асинхронного двигателя с пусковым сопротивлением

Параметры электродвигателя	Значения
Мощность двигателя, $P_n$ , Вт	30
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	305,78
Номинальное скольжение, $s_n$	0,0267
Номинальный ток статора, $I_n$ , А	0,42
Номинальный момент, $M_n$ , Нм	0,098
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,00385
Активное сопротивление фазы А статора, $R_{s\alpha}$ , Ом	102,5
Индуктивное сопротивление фазы А статора, $X_{s\alpha}$ , Ом	38,8
Активное сопротивление фазы В статора, $R_{s\beta}$ , Ом	80,7
Индуктивное сопротивление фазы В статора, $X_{s\beta}$ , Ом	14,4
Приведенное активное сопротивление ротора, $R_r$ , Ом	48,3
Приведенное индуктивное сопротивление ротора, $X_r$ , Ом	26
Индуктивное сопротивление от главного потока, $X_m$ , Ом	1040

Таблица П.1.4. Параметры асинхронного трехфазного двигателя серии 4А71В2У3

Параметры электродвигателя	Значения
Мощность двигателя, $P_n$ , Вт	1100
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	295,1
Номинальное скольжение, $s_n$	0,064
Номинальный ток статора, $I_n$ , А	2,5
Номинальный момент, $M_n$ , Нм	3,7
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0011
Активное сопротивление фазы А статора, $R_{s\alpha}$ , Ом	23,2
Индуктивное сопротивление фазы А статора, $X_{s\alpha}$ , Ом	9,62
Активное сопротивление фазы В статора, $R_{s\beta}$ , Ом	11,6
Индуктивное сопротивление фазы В статора, $X_{s\beta}$ , Ом	4,81
Приведенное активное сопротивление ротора, $R_r$ , Ом	6,41
Приведенное индуктивное сопротивление ротора, $X_r$ , Ом	7,48
Индуктивное сопротивление от главного потока, $X_m$ , Ом	249
Величина емкости рабочего конденсатора, $C_p$ , мкФ	12

Таблица П.1.5. Параметры двигателя постоянного тока

Параметры электродвигателя	Значения
Мощность двигателя, $P_n$ , Вт	120
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	314,1
Номинальное напряжение обмотки якоря, $U_{я}$ , В	110
Номинальный ток якоря, $I_{я}$ , А	1,53
Номинальный момент, $M_n$ , Нм	0,3825
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,06
Суммарное сопротивление якорной цепи, $R_{я}$ , Ом	1,48
Индуктивность якорной цепи, $L_{я}$ , Гн	0,0915
Электромагнитная постоянная времени якоря, $T_{э}$ , с	0,0618
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	110
Сопротивление обмотки возбуждения, $R_{в}$ , Ом	642
Номинальный коэффициент ЭДС двигателя, $K_E$	0,343
Коэффициент передачи двигателя по моменту, $K_M$	0,25

Таблица П.1.6. Параметры универсального коллекторного двигателя УВ 062-ПС

Параметры электродвигателя	Значения
Мощность двигателя, $P_n$ , Вт	1805
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	1466
Номинальное напряжение, $U_n$ , В	220
Номинальный ток якоря, $I_n$ , А	9,02
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,0018
Суммарное сопротивление якорной цепи, $R_{я}$ , Ом	2,33
Индуктивность якорной цепи, $L_{я}$ , Гн	0,01
Электромагнитная постоянная времени, $T_{я}$ , с	0,0043
Число витков обмотки возбуждения на полюс, $W_B$	131
Постоянная обмотки возбуждения, $T_B$ , с	0,0096
Электромагнитный поток, $\Phi_n$ , Вб	0,00077
Коэффициент линеаризации, $K_\phi$	0,00085
Конструктивный коэффициент двигателя, $K$	251,5

Таблица П.1.7. Параметры бесконтактного двигателя  
ДБМ-105-0,4-0,75-3

Параметры электродвигателя	Значения
Максимальная механическая мощность, $P_{\text{мех макс}}$ , Вт	24
Номинальная скорость вращения, $\omega_n$ , рад/с	58,85
Номинальное напряжение питания фазы, $U$ , В	18
Номинальный момент, $M_n$ , Нм	0,4
Момент инерции двигателя, $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0,001
Суммарное сопротивление фазы статора, $R$ , Ом	5
Электромагнитная постоянная времени, $T_э$ , с	0,00009
Число пар полюсов, $Z_p$	8
Число фаз обмотки статора, $m$	3
Коэффициент двигателя по ЭДС, $K_E$	0,18
Коэффициент двигателя по моменту, $K_M=1,5K_E$	0,27

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>РАЗДЕЛ 1. Общая характеристика электродвигателей бытовой техники</b> .....	5
<b>РАЗДЕЛ 2. Асинхронные микродвигатели</b> .....	8
2.1. Классификация и область применения .....	8
2.2. Общие принципы математического описания однофазных асинхронных двигателей .....	12
2.3. Системы координат, применяемые при исследованиях асинхронных машин, и особенности задания питающих напряжений .....	14
2.4. Обобщенная математическая модель асинхронного двигателя ..	17
2.5. Математическая модель конденсаторного асинхронного двигателя .....	26
2.6. Математическая модель асинхронного двигателя с повышенным активным сопротивлением пусковой обмотки .....	44
2.7. Математическая модель трехфазного асинхронного двигателя при включении в однофазную сеть .....	49
<b>РАЗДЕЛ 3. Коллекторные микродвигатели</b> .....	59
3.1. Коллекторные микродвигатели постоянного тока .....	59
3.1.1. Принцип работы коллекторных микродвигателей постоянного тока .....	59
3.1.2. Математическая модель коллекторного микродвигателя постоянного тока .....	60
3.2. Коллекторные двигатели переменного тока .....	64
3.2.1. Принцип действия коллекторного двигателя переменного тока.....	64
3.2.2. Математическая модель коллекторного микродвигателя переменного тока .....	66
<b>РАЗДЕЛ 4. Бесконтактные двигатели постоянного тока</b> .....	74
4.1. Принцип работы бесконтактных двигателей постоянного тока..	74
4.2. Математическая модель бесконтактного двигателя постоянного тока.....	80
<b>Список литературы</b> .....	85
<b>Приложение 1</b> .....	87

Навчальне видання

АНИЩЕНКО Микола Васильович

Компьютерное моделирование электроприводов бытовой техники

Навчальний посібник  
для студентів вищих навчальних закладів

(російською мовою)

Роботу до видання рекомендував *В. І. Мілих*  
В авторській редакції

План 2015 р., п. 128/

Підп. до друку \_\_\_\_\_ р. Формат  $60 \times 84^{1/16}$ . Папір офсетний.  
Riso-Друк. Гарнітура Таймс. Обл. вид. арк. 17,7. Наклад 100 прим.  
Зам. № \_\_\_\_\_. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ „ХПІ”.  
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Друкарня НТУ „ХПІ”, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21