

Министерство образования и науки России  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»

В.Г. Макаров

АНАЛИЗ СИСТЕМНЫХ СВОЙСТВ  
АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Монография

Казань  
Изд-во КНИТУ  
2012

**Макаров, В. Г.**

Анализ системных свойств асинхронного электропривода: монография / В.Г. Макаров; М-во образ. и науки России; Казан. нац. иссл. технол. ун-т. Казань: Изд-во КНИТУ, 2012. – 104 с.

ISBN 978-5-7882-1366-8

Изложены основные принципы построения асинхронных частотно-регулируемых электроприводов. Проведен анализ технического уровня современных асинхронных двигателей и преобразователей частоты. Рассмотрены принципы построения математических моделей трехфазных асинхронных двигателей с позиций теории обобщенной электрической машины. Приведены результаты анализа системных свойств разомкнутого электропривода с силовым полупроводниковым преобразователем и асинхронным двигателем, таких как управляемость, наблюдаемость и чувствительность. Даны рекомендации по использованию полученных результатов в системах частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями.

Предназначено для специалистов, занимающихся разработкой и исследованием частотно-регулируемого электропривода с асинхронными двигателями, аспирантов, магистрантов и студентов соответствующих направлений подготовки.

Подготовлено на кафедре электропривода и электротехники.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета.

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. *И. М. Валеев*  
канд. техн. наук, доц. *Е. В. Тумаева*

ISBN 978-5-7882-1366-8

© Макаров, В.Г., 2012  
©Казанский национальный исследовательский  
технологический университет, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития науки и техники системы электропривода прочно занимают лидирующее положение среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надежную работу технологических механизмов во многих отраслях промышленности и специальной технике.

В качестве приводного двигателя наибольшее распространение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором. Современный асинхронный электропривод реализуется на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Его возможности позволяют организовать регулирование выходных координат электропривода в широком диапазоне, с высокой точностью и быстродействием.

Современные преобразователи частоты с микропроцессорным управлением позволяют реализовывать традиционные или создавать новые программные алгоритмы и синтезировать асинхронные электроприводы с широким набором эксплуатационных характеристик, что, в свою очередь, позволяет удовлетворить требования, накладываемые со стороны самых разных технологических объектов.

В создание и развитие теории систем асинхронного электропривода значительный вклад внесли выдающиеся российские и зарубежные ученые – А. А. Булгаков, А. Ю. Афанасьев, И. Я. Браславский, В. Н. Бродовский, А. Б. Виноградов, Т. А. Глазенко, В. Л. Грузов, П. Е. Данилов, В. А. Дартау, Л. Х. Дацковский, З. Ш. Ишматов, В. Г. Каширских, А. Е. Козярук, В. И. Ключев, Г. Б. Онищенко, О. И. Осипов, Л. П. Петров, А. Д. Поздеев, В. Н. Поляков, В. В. Рудаков, Ю. А. Сабинин, А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов, А. С. Сарваров, О. В. Слежановский, М. М. Соколов, Г. Г. Соколовский, И. М. Столяров, А. А. Суптель, В. М. Терехов, В. Н. Хрисанов, В. А. Шубенко, Р. Т. Шрейнер, И. И. Эпштейн, *G. M. Asher, F. Blaschke, W. Floter, J. Holtz, W. Leonard, T. A. Lipo, D. W. Novotny* и многие другие.

Вопросы теории асинхронных электроприводов рассматриваются в [1 – 40]. На основании проведенного анализа составлена обобщенная структурная схема современного асинхронного электропривода, приведенная на рис. В.1.

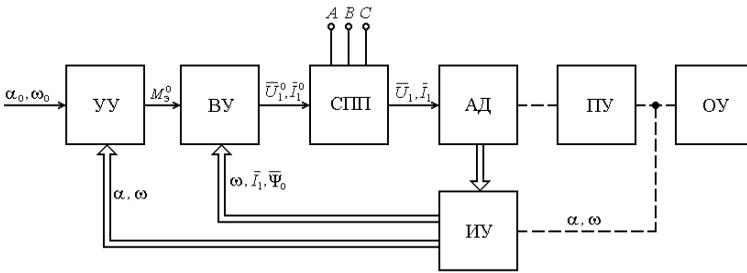


Рис. В.1. Обобщенная структурная схема асинхронного электропривода

В схеме на рис. В.1 ротор АД через передаточное устройство (ПУ) механически связан с объектом управления (ОУ). АД и ОУ связаны с информационным устройством (ИУ), в состав которого могут входить датчики фазных токов и напряжений, магнитного потока, угловой скорости  $\omega$ , угла поворота  $\alpha$ . По каналам обратной связи сигналы текущего угла поворота  $\alpha$ , угловой скорости  $\omega$ , компоненты векторов фазных токов статора  $\bar{I}_1$  и основного потокосцепления  $\bar{\Psi}_0$  поступают на входы устройства управления (УУ) и вычислительного устройства (ВУ). На вход УУ поступают задающие воздействия – требуемый угол поворота  $\alpha_0$  и требуемая угловая скорость ротора  $\omega_0$ . На выходе УУ формируется сигнал задания требуемого электромагнитного момента  $M_y^0$ , который должен создать двигатель. На основе этого сигнала и текущих значений  $\alpha$ ,  $\omega$ , а также компонент векторов  $\bar{I}_1$  и  $\bar{\Psi}_0$  ВУ формирует сигналы задания компонент векторов фазных напряжений  $\bar{U}_1^0$  или токов статора  $\bar{I}_1^0$ . Эти сигналы поступают на входы силового полупроводникового преобразователя (СПП), который формирует компоненты векторов фазных напряжений  $\bar{U}_1$  или токов  $\bar{I}_1$  статора. Управление угловой скоростью ротора и углом поворота ОУ осуществляется с помощью регулирования электромагнитного момента  $M_y$  согласно уравнениям движения электропривода:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_y - \dot{I}_{\text{н}}; \quad \frac{d\alpha}{dt} = \omega, \quad (\text{В.1})$$

где  $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции подвижных частей электропривода;  $I_{\bar{n}}$  – статический момент.

В соответствии с алгоритмом управления, заложенным в УУ, асинхронный электропривод может работать в одном из следующих режимов: регулирование, программное движение, сканирование, слежение.

Асинхронный электропривод работает в режиме регулирования, если  $\alpha_0$  и  $\omega_0$  являются постоянными величинами. Если  $\alpha_0$  и  $\omega_0$  изменяются по заранее определенным законам, то асинхронный электропривод работает в режиме программного движения. Частным случаем программного движения является сканирование. При случайном характере изменения  $\alpha_0$  и  $\omega_0$  асинхронный электропривод работает в следящем режиме.

ВУ обеспечивает формирование сигналов задания компонент векторов фазных напряжений  $\bar{U}_1^0$  или токов статора  $\bar{I}_1^0$  на основании сигнала задания требуемого электромагнитного момента  $M_y^1$  и сигнала обратной связи по угловой скорости ротора  $\omega$ .

Однако ряд проблем остается нерешенным.

Математические модели АД являются основой для исследования процессов электромеханического преобразования энергии. Особую значимость математические модели АД приобретают при разработке энергосберегающих алгоритмов управления автоматизированного асинхронного электропривода.

В математической теории электрических машин существуют два принципиально разных подхода к описанию процессов электромеханического преобразования энергии:

- 1) с позиций теории поля, базирующейся на уравнениях Максвелла;
- 2) с позиций теории электрических цепей, базирующейся на уравнениях Кирхгофа.

В настоящее время наиболее прогрессивным подходом к анализу процессов электромеханического преобразования энергии в электрических машинах является комбинированный подход, сочетающий в себе теорию поля и теорию электрических цепей [41 – 56]. Исходя из приближенного представления картины магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины, с достаточной точностью определяются ее параметры и записываются дифференциальные уравнения равновесия напряжений на обмотках, из которых вычисляются токи или потокосцепления. Зная закон изменения токов или потокосцеплений, получают зависимость

электромагнитного момента и записывают уравнение движения в зависимости от характера нагрузки и ее инерционности.

Для исследования АД в динамике традиционно используется система уравнений электромеханического преобразования энергии в фазных координатных осях [47, 49, 52]. Данная система уравнений нелинейна, поскольку дифференциальные уравнения фаз двигателя содержат в себе переменные коэффициенты, а уравнение электромагнитного момента содержит произведение токов, являющихся зависимыми переменными. Вообще уравнения с нелинейными параметрами не имеют точного решения, однако, применяя численные методы, можно получить высокую точность, необходимую при решении исследовательских задач [50].

В связи с этим при анализе электромагнитных и электромеханических процессов в АД, а также при разработке алгоритмов управления автоматизированного асинхронного электропривода широко используется преобразование координат, позволяющее перейти от системы дифференциальных уравнений в фазных координатных осях, содержащей переменные коэффициенты, к системе дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами в неподвижной или вращающейся двухфазной системе координат. Преобразование координат неразрывно связано с вопросами теории обобщенной электрической машины.

Основы математической теории обобщенной электрической машины сформулированы в 1920 – 1940 годы в работах Р. Парка, А. А. Горева, Г. Крона, Г. Н. Петрова, Д. Уайта, Г. Вудсона и других, где рассматриваются вопросы преобразования координат, приводятся математические модели и уравнения обобщенной электрической машины.

Существуют различные варианты преобразования координат, некоторые из них выполняются формально без сохранения физического смысла.

*Целесообразно осуществлять преобразование координат так, чтобы сохранить амплитуду результирующей МДС и величину магнитного потока, приходящегося на один полюс, а также эффективное число витков фаз обмоток.* Подобный подход позволит в дальнейшем при аппроксимации кривой намагничивания учитывать насыщение магнитопровода АД и строить более точные математические модели, а также разрабатывать энергосберегающие алгоритмы управления частотно-регулируемого электропривода с АД [57].

Следует отметить, что при переходе к обобщенной электрической машине значительное внимание уделяется вопросам преобразования координат, созданию математических моделей, а также их анализу. Однако вопросы

анализа конструктивных свойств обобщенной электрической машины с целью создания ее гипотетической физической модели не рассматриваются.

*Целесообразно установить соотношения между величинами и параметрами обобщенной электрической машины и трехфазного асинхронного двигателя при сохранении амплитуды результирующей МДС и величины магнитного потока, приходящегося на один полюс, а также эффективного числа витков фаз обмоток [57].*

Асинхронный электропривод обычно является составной частью электромеханической системы, выполняющей определенные технические или производственные задачи. Анализ системных свойств разомкнутого электропривода с силовым полупроводниковым преобразователем и трехфазным АД позволит реализовывать более эффективные алгоритмы частотного управления. К системным свойствам электропривода традиционно относят управляемость, наблюдаемость и чувствительность [58, 59]. Вопросы анализа системных свойств электроприводов постоянного тока рассматриваются в [58, 59, 60], однако вопросы анализа системных свойств электроприводов с АД освещены не полностью.

Полная управляемость – это свойство, состоящее в возможности перевода объекта управления из произвольного начального состояния в конечное состояние за заданное время [61].

Под наблюдаемостью понимается свойство объекта управления, заключающееся в возможности восстановления всех фазовых координат по известному закону изменения вектора наблюдения [61].

Чувствительностью является свойство объекта управления изменять процессы при изменении первичных параметров [62, 63].

Анализ полной управляемости и наблюдаемости в [58, 59, 64] производится с использованием матриц управляемости и наблюдаемости соответственно, а для анализа чувствительности используются функции чувствительности, представляющие собой частные производные от величин или процессов по параметрам или по функциям отклонений. При этом на основе векторно-матричного описания электропривода формируются матрицы управляемости и наблюдаемости, а также определяются функции чувствительности.

В [60, 65] при анализе управляемости для фазовых координат электропривода вводится понятие «порядок управляемости», который при нулевых начальных условиях и напряжении управления, изменяющемся по закону единичной функции, совпадает с младшей степенью разложения законов изменения фазовых координат в ряд Маклорена.

Анализ наблюдаемости трехфазного АД является актуальным в связи с тем, что величины короткозамкнутого ротора не подлежат непосредственному измерению. Информация о токах или потокосцеплениях ротора необходима при идентификации параметров трехфазного АД, а также при реализации алгоритмов векторного управления [29, 30, 66].

В [67] проведен анализ чувствительности АД на основании схемы замещения фазы и ее математического описания. Записаны уравнения функций чувствительности, а также разработана схема устройства генерации функций чувствительности по шести параметрам схемы замещения фазы АД.

*Целесообразно провести анализ системных свойств асинхронного электропривода*, на основании которого могут быть решены следующие вопросы:

1) анализ управляемости разомкнутой системы «силовой полупроводниковый преобразователь – асинхронный двигатель», в результате которого можно установить порядок управляемости каждой из фазовых координат электропривода;

2) наблюдение токов короткозамкнутого ротора на основании информации о напряжениях и токах фаз статора АД, полученной путем непосредственного измерения этих величин;

3) анализ чувствительности разомкнутой системы «силовой полупроводниковый преобразователь – асинхронный двигатель», на основании которого можно записать выражения функций чувствительности и разработать структурную схему устройства генерации функций чувствительности.

В связи с этим возникает актуальная проблема анализа системных свойств асинхронного электропривода, решаемая в данной работе.

В первой главе «Анализ технического уровня современного асинхронного электропривода» проводится анализ технического уровня трехфазных асинхронных двигателей, преобразователей частоты, а также алгоритмов функционирования и структурных схем асинхронных электроприводов. Показано, что современный асинхронный электропривод позволяет решать целый комплекс задач, связанных с повышением качества продукции и эффективности технологического оборудования, энерго- и ресурсосбережения, и представляет собой весьма сложную электромеханическую систему с микропроцессорным или микроконтроллерным управлением, все компоненты которой проектируются и изготавливаются с использованием современных материалов и высокотехнологичного оборудования.

Во второй главе «Линейные математические модели трехфазного асинхронного двигателя» рассматривается линейная математическая модель трехфазного асинхронного двигателя в фазных координатных осях, преобразование уравнений этой математической модели к системе координат  $d, q$  с сохранением результирующих магнитодвижущих сил и эффективного количества витков фаз обмоток. Установлены соотношения между величинами и параметрами фаз обмоток статора и ротора обобщенной электрической машины и трехфазного асинхронного двигателя. Приводятся результаты компьютерного моделирования, подтверждающие соблюдение принципа инвариантности мгновенной мощности, что позволяет судить о корректности выполненных преобразований.

В третьей главе «Системные свойства асинхронного электропривода» проводится анализ управляемости, наблюдаемости и чувствительности разомкнутого электропривода с силовым полупроводниковым преобразователем и асинхронным двигателем. При анализе управляемости разомкнутого асинхронного двигателя и силового полупроводникового преобразователя предлагается использовать понятие порядка управляемости. Показано, что порядок управляемости каждой фазовой координаты электропривода совпадает с младшей степенью разложения закона ее изменения в ряд Маклорена. Установлено, что асинхронный двигатель, силовой полупроводниковый преобразователь и разомкнутый электропривод на их основе обладают свойством полной управляемости. Поставлена и решена задача наблюдения токов короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Получены выражения токов ротора через переменные статора. Компьютерное моделирование подтвердило высокую точность расчета токов ротора. Получены уравнения функций чувствительности по параметрам разомкнутого электропривода с силовым полупроводниковым преобразователем и асинхронным двигателем, разработана структурная схема устройства генерации функций чувствительности.

# ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СОВРЕМЕННОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

## 1.1. Анализ способов управления асинхронными двигателями

При использовании двухфазного АД формирование сигналов задания фазных напряжений статора может быть осуществлено следующими способами: амплитудным, фазовым, амплитудно-фазовым.

При амплитудном способе регулирования скорости АД обеспечивается изменение амплитуды напряжения управления при неизменной его фазе, а при фазовом способе – изменение фазы напряжения управления при неизменной его амплитуде. Одновременное изменение амплитуды и угла сдвига между напряжениями управления и возбуждения обеспечивается при амплитудно-фазовом способе регулирования скорости АД [16].

В случае использования трехфазного АД применяются методы частотного регулирования скорости, которые можно разделить на два класса [27, 29, 30]:

- 1) скалярное управление;
- 2) векторное управление.

Принцип скалярного управления базируется на изменении частоты и текущих значений модулей переменных АД (напряжений, токов, магнитных потоков). Управляемость АД при этом обеспечивается совместным регулированием частоты и напряжения, либо частоты и тока статорной обмотки. Первый способ управления принято трактовать как частотное управление, второй – как частотно-токовое управление.

Идеализированный закон изменения напряжения и частоты при условии постоянства перегрузочной способности АД сформулирован М. П. Костенко [16]:

$$\frac{U_1}{U_{1i}} = \frac{f_1}{f_{1i}} \sqrt{\frac{M_{\dot{y}}}{M_{\dot{y},i}}}, \quad (1.1)$$

где  $U_{1i}$ ,  $f_{1i}$ ,  $M_{\dot{y},i}$  – номинальные значения фазного напряжения, частоты и электромагнитного момента;  $U_1$ ,  $f_1$ ,  $M_{\dot{y}}$  – текущие значения фазного напряжения, частоты и электромагнитного момента.

При постоянном моменте на валу (1.1) принимает вид: