

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Автоматизированный электропривод»
Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
автоматизированного электропривода,
д.т.н., профессор

_____ / М.А. Григорьев /
« _____ » _____ 2020 г.

Экспериментальное исследование алгоритмов автоматической настройки
электроприводов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ БАКАЛАВРИАТА
«ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВОК
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ»
ЮУрГУ–13.03.02.2020.049 ВКР

Руководитель, к.т.н., доцент

_____ / А. Е. Бычков /
« _____ » _____ 2020 г.

Автор работы,
бакалавр группы П-477

_____ / А. В. Александров /
« _____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер, к.т.н., доцент

_____ / Т.А. Функ /
« _____ » _____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Александров А.В. Александров А. В.
Экспериментальное исследование алгоритмов
автоматической настройки электроприводов. – Челябинск:
ЮУрГУ, Э; 2020, 59 с., 32 ил., 9 табл., библиографический
список – 15 наим.

Целью дипломной работы является исследование реализации современных алгоритмов автоматической настройки в реальных замкнутых системах электропривода, в составе которых находится полупроводниковый преобразователь.

На первом этапе исследования произведен обзор современных алгоритмов идентификации обмоточных данных электропривода и следующих из них алгоритмов автоматической настройки в теоретических источниках и научных статьях.

Далее в выпускном квалификационном проекте подробно рассмотрено экспериментальное исследование алгоритмов автоматической настройки для трех классических типов электропривода: электропривод постоянного тока с подчиненным регулированием, асинхронный электропривод с векторным управлением и синхронный электропривод с частотно-токовым управлением. Приведены схемы для исследования и основные осциллограммы, полученные при этом экспериментальном исследовании.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>			
		<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Выполнил.</i>	<i>Александров А. В.</i>				Экспериментальное исследование алгоритмов автоматической настройки электроприводов	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Бычков А.Е.</i>						4	
<i>Н. Контр.</i>	<i>Функ Т. А.</i>					<i>ЮУрГУ</i>		
	<i>Григорьев М. А.</i>							

2.4.1 Обычный режим.....	55
2.4.1 Недвижный режим.....	56
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	57
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	58

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		6

ВВЕДЕНИЕ

В середине 20 века, когда в составе электропривода использовались преимущественно двигатели постоянного тока, была проблема с регулировкой параметров для двигателя. В цепь якоря вводились дополнительные резисторы для регулирования скорости изменением наклона механической характеристики. Это, конечно было неэкономично, много энергии тратилось на нагреве. Затем двигатели постоянного тока начали вытесняться асинхронными двигателями (особенно с короткозамкнутым ротором – в силу своей дешевизны и неприхотливости в обслуживании). У АД существовала такая же схема регулирования координат, но кроме того, их пуск без дополнительных пусковых резисторов был затруднителен в силу большого пускового тока (момента), что, конечно же негативно сказывалось на показателях электропривода и точности регулирования необходимых величин. Всё изменилось с появлением силовых преобразователей: тиристорных преобразователей для двигателей постоянного тока и преобразователей частоты для двигателей переменного тока соответственно. Современный электропривод невозможно представить без силовой части. На смену регулировке с помощью резисторов пришли более новые методы изменения координат (частота, напряжение, ток). Но вместе с усложнением силовой части, усложнилась и задача системы управления необходимой системой: нужно запрограммировать привод так, чтобы поддерживалась необходимая точность, а энергетические показатели и скорость обработки сигналов должна быть максимальная. Кроме того появление замкнутых систем регулирования поставило перед специалистами задачу настройки системы в устойчивом режиме. Здесь на помощь специалисту и «приходит» идентификация параметров электропривода.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		7

Автоматическая настройка помогает при вводе электропривода в эксплуатацию, во-первых, найти параметры двигателя (сопротивления активные/индуктивные, токи холостого хода, намагничивания), а, во-вторых, для замкнутых систем рассчитать параметры коэффициентов усиления, которые будут оптимальны для используемого типа управления. Причём в процессе работы при помощи активной идентификации СУ преобразователя сама будет отслеживать изменения параметров двигателя, и подстраивать значения сигналов управления. В обобщённом виде можно сказать, что идентификация работает по такому принципу: запускается какой-то тестовый сигнал тока и напряжение и в зависимости от того, как реагирует привод, высчитывает сопротивления и другие нужные величины. В данной работе будут исследоваться способы и методы идентификации более подробно. С целью узнать и объяснить явление автонастройки в электроприводе.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		8

1 ОПИСАНИЕ И ОБЗОР МЕТОДИК АВТОМАТИЧЕСКОЙ НАСТРОЙКИ

Актуальность и практический аспект данной проблемы связан с тем, что автоматическая настройка электропривода как переменного, так и постоянного тока в настоящее время используются в любом алгоритме систем управления электроприводов. Развитие возможностей полупроводниковых преобразователей привело к значительному росту их вычислительной мощности, что способствует возможности обработки большого массива данных. Поэтому системы электропривода могут вычислять параметры объекта управления, которые не приведены в технической документации на конкретный агрегат, кроме того существует возможность проверки параметра в реальном времени (например, отслеживание изменения активного сопротивления статора асинхронного двигателя вследствие нагрева обмоток). Неточности в определении параметров схемы замещения электродвигателя могут привести к неудовлетворительному качеству переходных процессов, что может отрицательно сказаться на устойчивости системы и привести к неблагоприятным последствиям. Также стоит отметить, что точное знание параметров приобретает особое значение в современных системах с непосредственным управлением момента. Актуальность тематики обусловлена ещё и тем, что программно-алгоритмическое обеспечение и идентификационные модели зарубежных производителей закрыты, а вмешательство конечного потребителя в базовые алгоритмы управления и идентификации электропривода практически невозможна.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		9

Тенденция на непрерывное развитие всех современных отраслей производства, тем более высокотехнологичных, немислимо без внедрения в технологический процесс электроприводов с высокими требованиями к точности отслеживания и регулирования необходимых координат. Электропривод является одним из ключевых звеньев любого технического комплекса, поэтому он должен в первую очередь соответствовать заранее определённым критериям качества, которые определяются на этапе планирования и проектирования производственной экосистемы.

Будучи сложным комплексом для качественного управления электроприводом, нужно в полном объёме обладать знанием математической модели и непосредственных данных схемы замещения. Здесь и нужна идентификация системы ЭП, т.к. многие системы не позволяют напрямую получать эти данные. Задача системы управления к тому, чтобы измерять «недостающие» параметры электропривода.

Естественно параметры двигателя можно узнать простыми способами, к примеру, посмотреть паспортные данные устройства. Также можно прибегнуть к измерительным способам (метод амперметра-вольтметра, способ обыкновенного и двойного моста). Однако в ходе работы привода эти параметры могут изменяться в довольно широких диапазонах, конечно же изменение даже одной из переменной в математической модели влечет за собой неизбежные погрешности, Изменения связаны в основном с тепловыми эффектами при протекании тока. Сложность практической реализации связана с тем, что СУ должна обрабатывать большой массив данных, но эту проблему можно несколько нивелировать, если рассматривать установившееся режимы работы. Объектом исследования являются общепромышленные электроприводы как переменного, так и постоянного тока. Предметом исследования выступает автоматическая настройка привода.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		10

1.1 История применения методов автоматической настройки

Исторически первым универсальным способом идентификации обмоточных данных с последующей возможностью применения этих данных в алгоритмах автоматической настройки является аппарат частотных характеристик. Метод заключается в том, чтобы описать работу системы с помощью уравнений в виде структурной схемы, состоящей из типовых динамических звеньев и оценить прохождение через звенья указанной системы гармонического сигнала синусоидальной формы. На основании данного метода определяется результирующая аппроксимированная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика системы. Характеристика описывалась уравнением вида:

$$L(\omega) = 20\lg\left(\frac{A_y(\omega)}{A_x}\right),$$

где A_x – гармонический сигнала на входе системы, а A_y – гармонический сигнал на выходе системы, затем по виду графической зависимости определяли область пропускания, на основании чего получали пределы устойчивости системы. Подобный алгоритм также позволяет упростить расчеты, ввиду того, что заменяет операцию умножения операцией сложения логарифмов. В дальнейшем был реализован метод экспериментального определения частотных характеристик, основанный на получении вещественной и мнимой составляющей частотной характеристики:

$$L(\omega) = 20\lg(\sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}).$$

Главным достоинством данного метода являлась возможность оценивать неучтённые особенности функционирования и динамические возможности системы.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		11

С развитием прогресса число цифровых элементов в составе электроприводов возросло, это привело к тому, что математическое описание, являющееся ядром частотного анализа, сильно усложнилось. Также с появлением цифровых систем управления появилась возможность производить определение параметров непосредственно с помощью функционала преобразователя, находящегося непосредственно в составе электропривода [6, 7].

1.2 Современные алгоритмы идентификации параметров электрических двигателей

Зачастую на специалиста, который разрабатывает систему управления к электроприводу ложится ответственность за нивелирование таких негативных факторов (влияющих на эту систему), как изменение в процессе работы привода его параметров и нестабильность параметров внешних воздействий в системе «управляемый преобразователь – двигатель».

Изменение параметров ЭП происходит вследствие изменения таких основных физических величин системы и электродвигателя в частности, как: параметров электромагнитных контуров в цепи, магнитного потока двигателя, моментов инерции механизмов, частот упругих механических колебаний. Не маловажными факторами в процессе эксплуатации ЭП являются изменения интенсивности возмущающих и управляющих воздействий, что в свою очередь приводит к увеличению динамических ошибок системы, которые необходимо будет исправлять путём перенастройки параметров регуляторов.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		12

При этом задача СУ в том, чтобы выбрать такой вектор, при котором сумма квадратов отклонений измерений от этого вектора будет минимальной.

Математический аппарат имеет простоту реализации и осуществляет простоту реализации, наглядность и при этом получаемые оценки являются достаточно точными [1].

Рекуррентный метод наименьших квадратов появился – как модификация к указанным выше методам. Данный способ идентификации имеет высокие требования к точности описания математической модели, что является сложностью, но зато в свою очередь полнота и точность исходных данных не имеет такого требования.

Далее рассмотрим методику использования расширенного фильтра Калмана, который появился из вышеописанных методов. Часто этот способ идентификации используют для определения потокосцепления и активного сопротивления ротора. Требуется упомянуть тот факт, что отсутствует возможность в реальном времени оценивать и сопротивление ротора, и потокосцепление при установившемся режиме работы АД. Поэтому величины оцененные в результате предварительного вычисления можно использовать в качестве расчёта каналов усиления регуляторов при построении замкнутой системы на основе векторного управления. Основным недостатком данного метода является невозможность его применения для нелинейных систем [8].

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		16

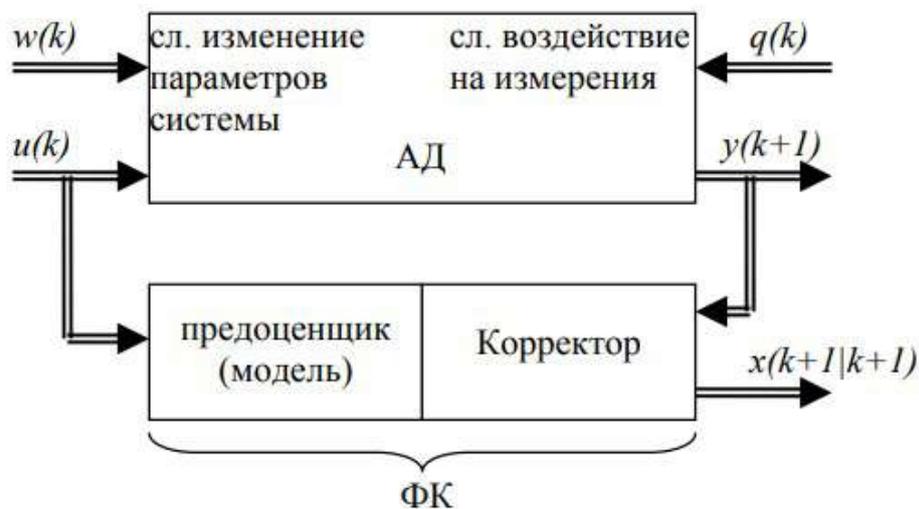


Рисунок 1.3 – Фильтр Калмана

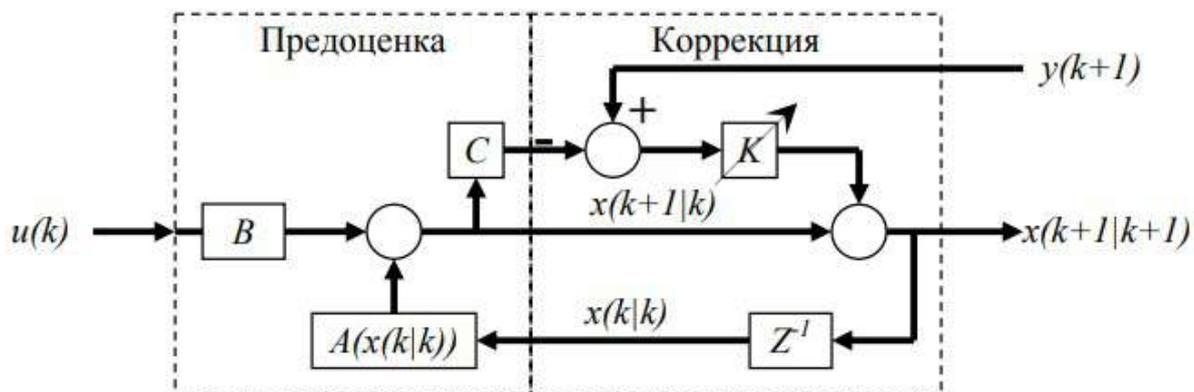


Рисунок 1.4 – диаграмма работы фильтра Калмана

где $w(k)$ – вектор случайных воздействий, $q(k)$ – вектор случайных помех, $u(k)$ – известное входное воздействие из построенной физической модели, k – шаг итерации, x – отфильтрованное значение, $y(k+1)$ – корректировка

Рассматривая динамический класс идентификации (структурная схема приведена на рисунке 1.5), стоит отметить метод с дополнительным вводом тестового информационного сигнала.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

Чаще всего метод с применением методов с применением тестового идентифицирующего сигнала не может быть произведён в режиме эксплуатации электродвигателя при непосредственном участии в техническом процессе. Что не является препятствием к использованию метода при предварительной настройке электропривода перед вводом его в эксплуатацию. Метод основан на подаче на двигатель с помощью системы векторного управления специально сформированного вектора напряжения с малой амплитудой и нулевой частотой вращения. Далее по измеренному току статора вычисляется сопротивление.

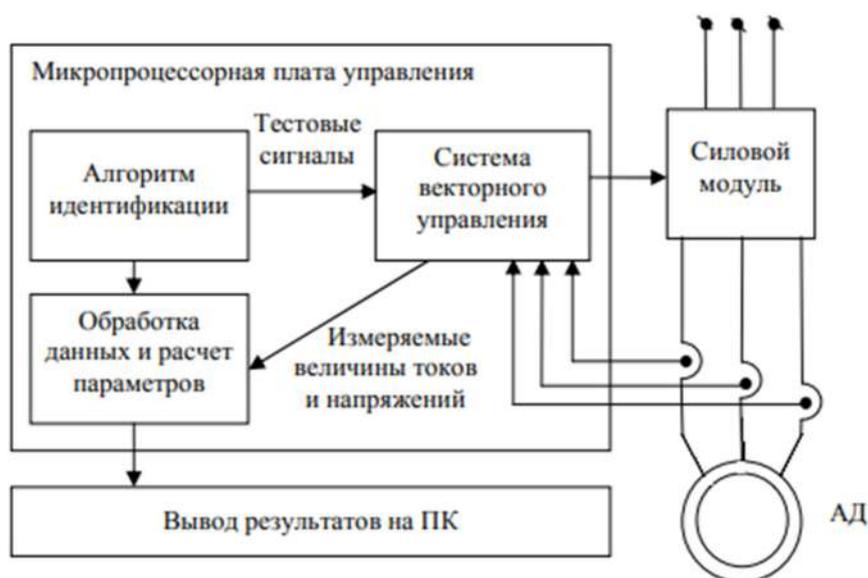


Рисунок 1.5 – Структурная схема активной идентификации

Автонастройка обладает пагубным влиянием на питающую сеть, а именно, возникает не симметрия питающего напряжения и произвольные потери мощности в цепи измерения фазных токов статора.

К самым свежим разработкам в области им можно отнести группу на основе теории адаптивных систем (АС).

АС обладают способностью изменять параметры или значения каналов усиления регуляторов при изменении параметров объекта управления или увеличению/уменьшению поступающих возмущений на объект. Данный метод вводят в работу, когда необходима большая точность управления, по сравнению с другими принципами идентификации. Согласно этому методу выполняется адаптивная идентификация неизвестных параметров асинхронного привода с помощью его математической модели. За улучшенную точность алгоритма, потребитель получает сложную математическую модель, поэтому для расчета необходимо накапливать информацию, что требует от преобразователя свободной памяти и скорости передачи сигналов во время работы привода. В свою очередь, благодаря располагаемым ресурсам, метод показывает очень высокую точность оценки параметров АД [10].

1.2.2 Двигатели постоянного тока

Теперь рассмотрим машину постоянного тока.

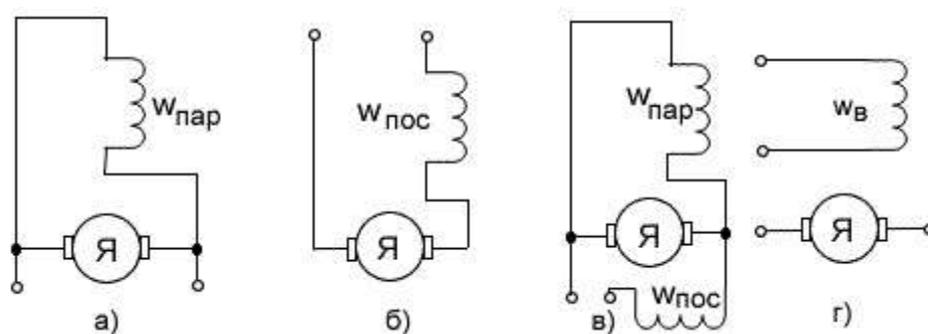


Рисунок 1.6 – Двигатель с возбуждением: а) параллельным, б) последовательным, в) смешанным, г) независимым.

Динамический способ идентификации ДПТ является действенным способом оценивания параметров двигателя, а вместе с тем и защиты устройства от токовых перегрузок.

Настройка позволяет в режиме реального времени проводить оценку параметров двигателя и на следующем этапе изменять значения регуляторов, если это необходимо для поддержания точности требуемых величин.

Оценивать параметры ДПТ можно с помощью поисковых методов, смысл которого довольно просто: в замкнутой системе с обратной отрицательной связью составляются две модели: сам двигатель и его предположительная модель, в которой параметры настраиваются так, что между выходными сигналами была минимальная разность (в идеале 0) (рисунок 1.7) [4].

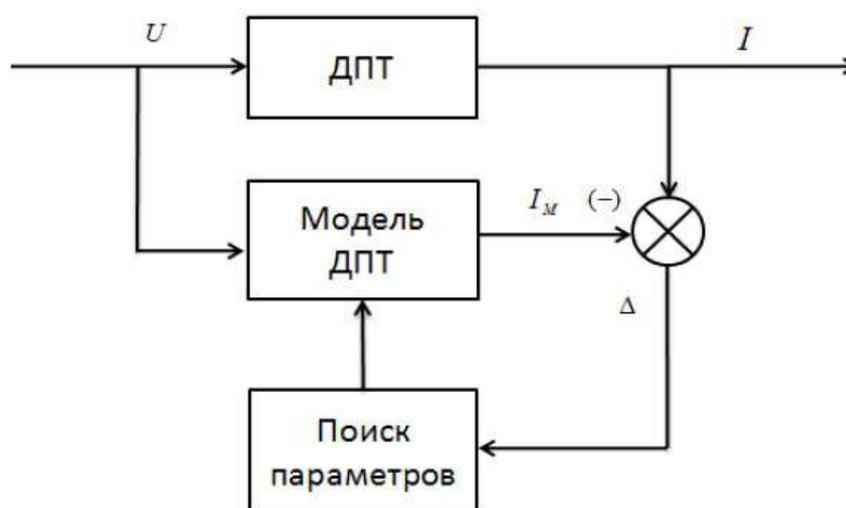


Рисунок 1.7 – Блок-схема поисковых методов

где U, I – питающее напряжение и ток обмотки якоря (возбуждения) ДПТ;

I_M – ток модели обмотки якоря (возбуждения);

Δ – разность сигналов модели и обмотки.



Рисунок 1.8 – Блок-схема генетического алгоритма

Далее рассмотрим анализ параметров с помощью метода роя частиц. Данный метод является самым прогрессивным и относится к методам с использованием искусственного интеллекта (ИИ).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

22

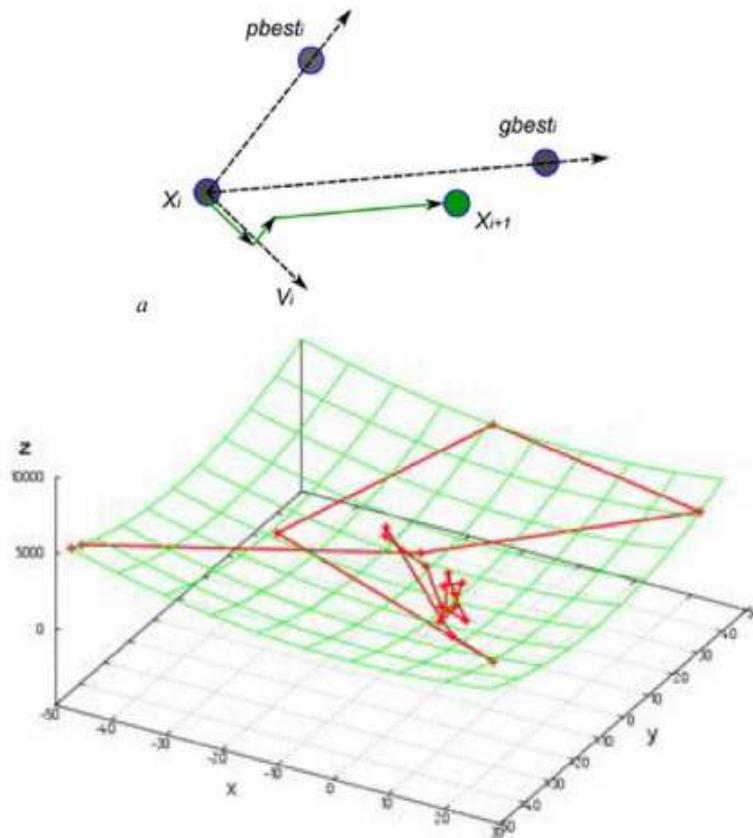


Рисунок 1.9 – Пояснение алгоритма поиска: а) пример вычисления новой позиции; б) пример движения отдельной частицы по определённой функции

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

24

1.2.3 Синхронные двигатели

На очереди синхронные машины.

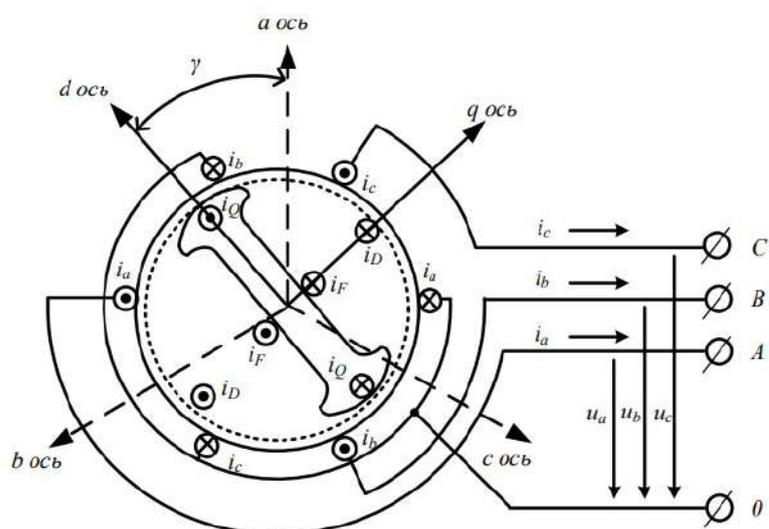


Рисунок 1.10 – Синхронная машина с взаимным расположением осей abc и qd

Широко распространены СД с постоянными магнитами, потому что они экономичны, просты в конструкции и управлении.

В связи с этим становится актуальная проблема - зависимость момента двигателя от угла положения ротора (пульсации момента), которая вызвана не синусоидальностью магнитного потока ротора, который создаётся постоянными магнитами. Метод состоит в том, чтобы разложить несинусоидальный поток ротора в ряд Фурье, и учесть высшие гармоники, которые и создают пульсации момента [5].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

25

Запишем условие баланса напряжений в обмотках статора двигателя в продольной d и поперечной q осях в форме уравнений Парка-Горева:

$$\begin{cases} U_d = RI_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q - \omega \psi_q(\theta); \\ U_q = RI_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega L_d I_d - \omega \psi_d(\theta), \end{cases}$$

где U_d, U_q, I_d, I_q – компоненты векторов напряжения и тока в обмотках статора двигателя, которые представлены в координатах (d, q) ;

R – активное сопротивление обмоток статора;

L_q, L_d – матрицы индуктивностей обмоток статора в осях q и d соответственно;

ω – угловая частота вращения ротора;

$\psi_d(\theta), \psi_q(\theta)$ – потокосцепления обмоток статора, создаваемые магнитами ротора, в осях d и q соответственно.

Также представим потокосцепления $\psi_d(\theta), \psi_q(\theta)$ в форме:

$$\begin{cases} \psi_d(\theta) = \psi_{d0} + \psi_{d6} \cos(6\theta) + \psi_{d12} \cos(12\theta); \\ \psi_q(\theta) = \psi_{q6} \sin(6\theta) + \psi_{q12} \sin(12\theta), \end{cases}$$

где $\psi_{d0}, \psi_{d6}, \psi_{d12}, \psi_{q6}, \psi_{q12}$ являются неизвестными параметрами поля и подлежат идентификации.

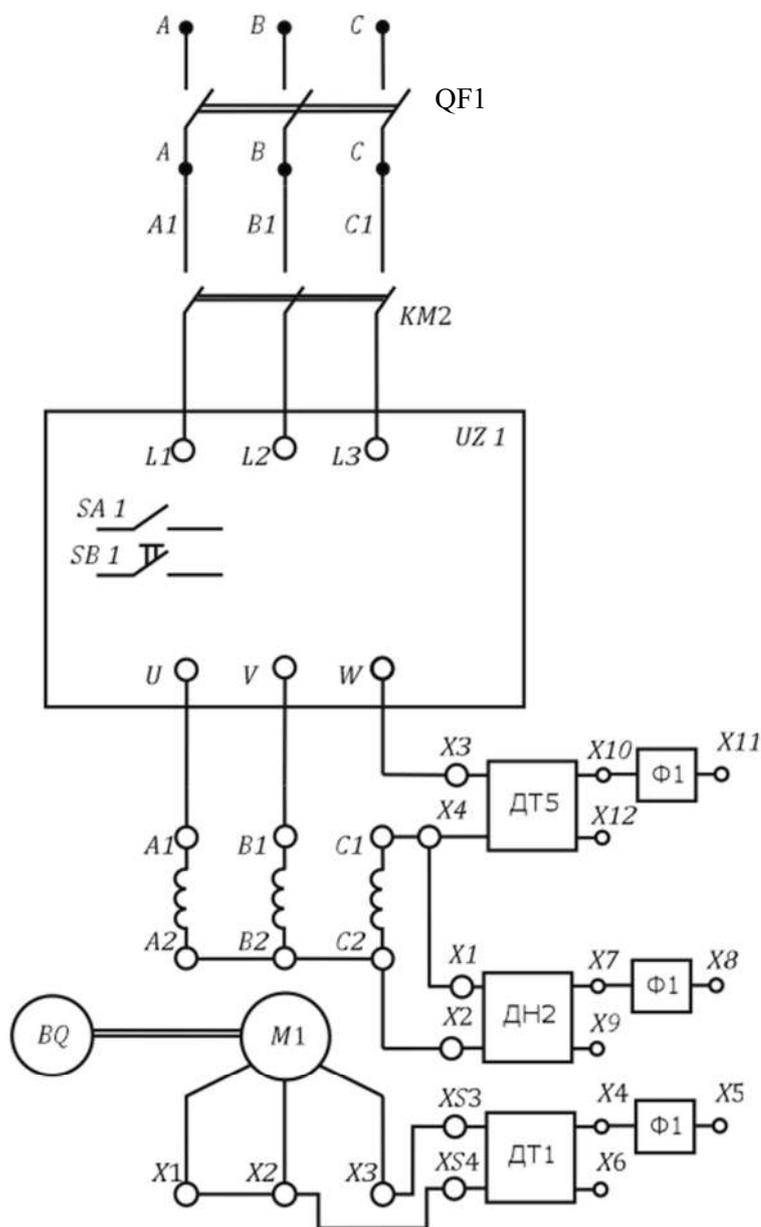


Рисунок 2.1 – Функциональная схема силовых цепей и подключения датчиков при снятии опытных данных при скалярной системе управления

Представленный преобразователь частоты имеет 4 различных режима работы: скалярное, векторное, серво (для синхронных машин) и рекуперация. В данном пункте будут подробно рассмотрены наиболее часто применяющиеся режимы в асинхронном электроприводе скалярного и векторного управления.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

29

2.1.1 Скалярное управление (разомкнутый контур)

Для случая скалярного управления преобразователь частоты Unidrive SP имеет два типа автоматических настроек: настройка с неподвижным ротором и настройка с вращающимся ротором.

При тесте с неподвижным ротором измеряется сопротивление статора (Pr 5.17) и сдвиг напряжения (Pr 5.23). При этом коэффициент мощности (Pr 5.10) остаётся неизменным. Значения Pr 5.17 и Pr 5.23 сохраняются в ЭППЗУ. Также в данном случае измеряется переходная индуктивность (Pr 5.24). Хотя переходная индуктивность и не используется непосредственно приводом, но это промежуточная величина необходима, чтобы получить расчёт для коэффициента мощности (Pr 5.10) после выполнения теста с вращением. Тест с вращением ротора отличается только тем, что происходит измерение коэффициента мощности. Как видно из описания данные параметры нужны для определения величин, которые используются при компенсации скольжения, в полностью разомкнутой же системе данный алгоритм практически не используется.

Для того чтобы запустить автонастройку с неподвижным ротором необходимо перевести параметр (Pr.) 5.12 в значение «1». Далее приведём осциллограммы переходных процессов, полученных при данной настройке.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.0173</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		30

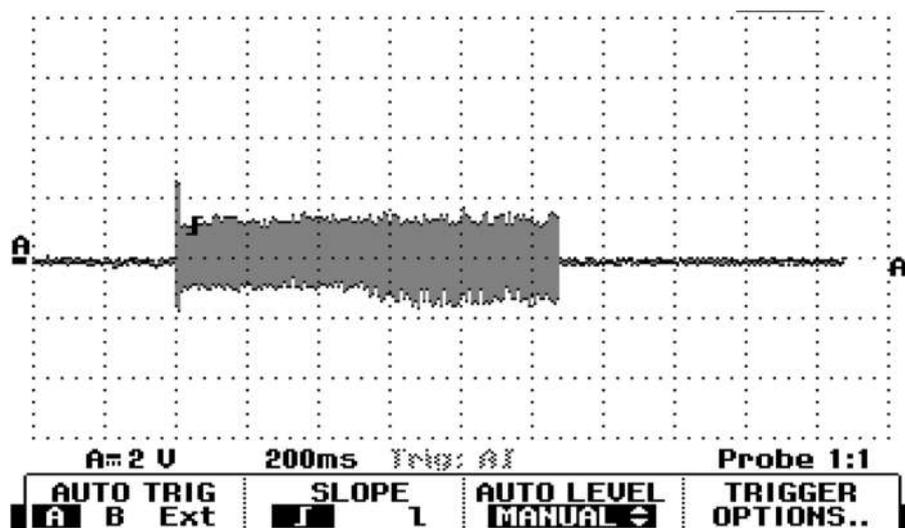


Рисунок 2.2 – Линейное напряжение на статоре

Внешний вид осциллограмм подтверждает данные, заявленные производителем – производится измерение сопротивления путем подачи двух уровней статорного тока на обмотку статора, на основании чего методом амперметра-вольтметра и определяется сопротивление.

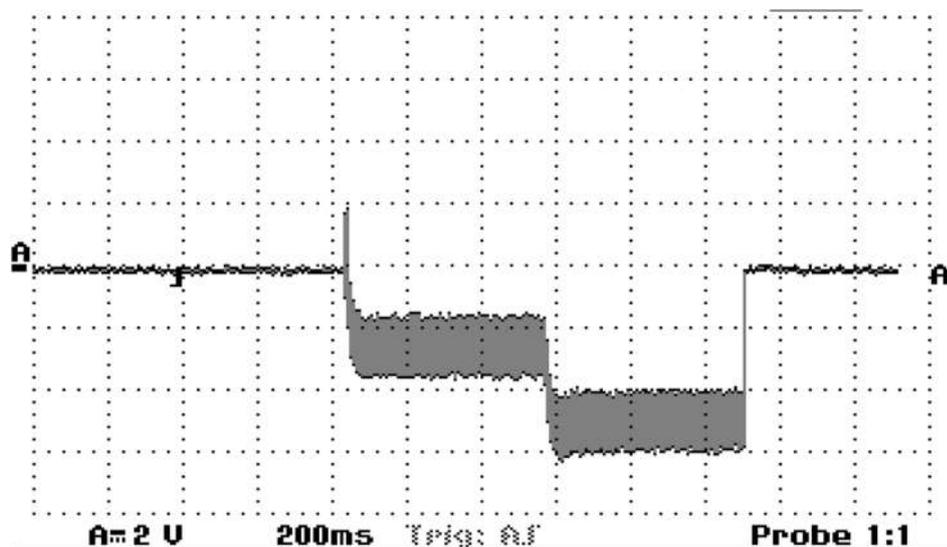


Рисунок 2.3 – Ток статора

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

31

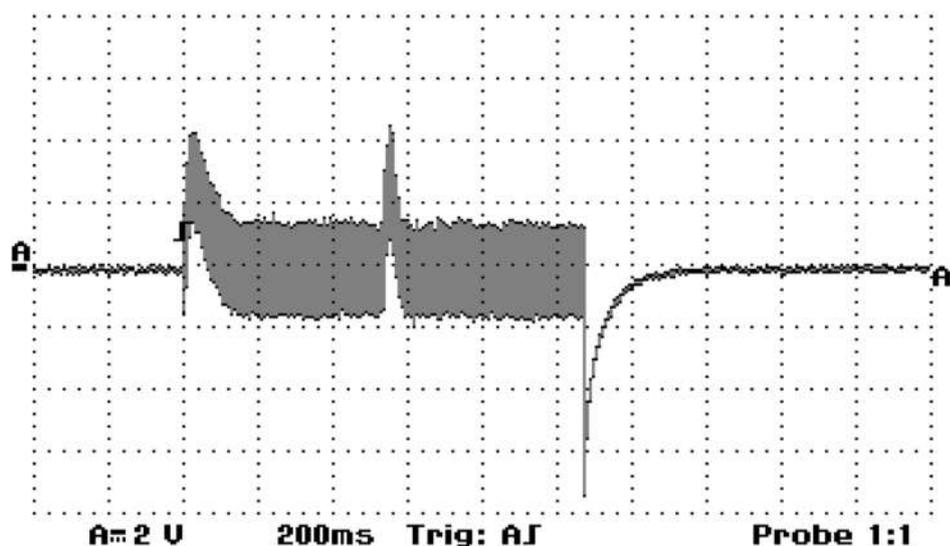


Рисунок 2.4 – Ток ротора

2.1.2 Векторное управление (замкнутый контур)

Когда необходима более точная регулировка скорости асинхронного двигателя, плавное регулирование скорости и момента электродвигателя во всём диапазоне частот, то используют замкнутые системы управления с векторным управлением. Для режима векторного управления в рассматриваемом преобразователе предусмотрены 4 типа настроек: тест с подвижным, неподвижным ротором; измерение момента инерции; вычисление только коэффициентов усиления регулятора тока. Как видно из описания, в отличие от предыдущего алгоритма работы, здесь уже присутствуют алгоритмы автоматической настройки.

2.1.2.1 Тест с неподвижным ротором

При опасности повреждения механической части электропривода во время тестового вращения вала, применяется тест с неподвижным ротором. Данная функция позволяет с одной стороны провести настройку, с другой же – не допустить повреждения механических узлов при тестовых рывках вала электродвигателя.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

32

В принципе работы автонастройки будет фигурировать меню 4, поэтому необходимо указать упоминаемые далее параметры:

Коэффициенты усиления K_p и K_i используются в регуляторе тока для формирования осциллограмм тока заданной формы в переходных (максимальное быстродействие, минимальное перерегулирование) и установившихся режимах. Изначально «защитые» в СУ преобразователя значения каналов усиления хорошо подходят для большинства двигателей и настроены на модульный оптимум. Однако, так как всякая система индивидуальна, можно попробовать несколько изменить эти значения, чтобы добиться лучших характеристик. Самым критичным параметром для работы является коэффициент пропорционального усиления (Pr 4.13), он отвечает за быстродействие, его величина определяется при автонастройке, при этом преобразователь настраивает ее согласно соотношению:

$$Pr\ 4.13 = K_p = \frac{L}{T} \cdot \frac{I_{fs}}{V_{fs}} \cdot \frac{256}{4},$$

где T – это время опроса, т.е. через данный промежуток времени процессор в преобразователе опрашивает состояние регулятора. Для данного преобразователя следует считать, что время выборки равно низшей частоте опроса в 167 мксек;

L – это индуктивность двигателя. Для асинхронного двигателя, исследование которого и проводится в данном опыте это переходная индуктивность на фазу (σL_s). Это значение индуктивности хранится в Pr 5.24 после выполнения теста автонастройки;

I_{fs} – максимальное значение тока, которое может обработать обратная связь, причём при этом токе не срабатывает защита.

Это значение вычисляется по формуле:

$$I_{fs} = \text{Номинальный ток привода} \cdot \frac{\sqrt{2}}{0.45},$$

где V_{fs} – это максимальное напряжение на звене постоянного тока, а номинальный ток привода указан в Pr 11.32;

Поэтому:

$$\begin{aligned} \text{Pr 4.13} = K_p &= \frac{L}{167 \text{ мксек}} \cdot \text{Номинальный ток привода} \cdot \frac{\sqrt{2}}{0.45 \cdot V_{fs}} \cdot \frac{256}{4} = \\ &= K \cdot L \cdot \text{Номинальный ток привода}, \end{aligned}$$

$$\text{где } K = \frac{\sqrt{2}}{0.45 \cdot V_{fs} \cdot 167 \text{ мксек}} \cdot \frac{256}{4}$$

Таблица 2.3 – соотношение коэффициента К при разных уровнях напряжений

Номинальное напряжение привода, В	V_{fs} , В	К
200	415	2,902
400	830	1,451
575	990	1,217
690	1190	1,013

Такая настройка обеспечивает переходный процесс системы с минимальным перерегулированием после ступенчатого изменения задания тока. По таблице, приведённой ниже, можно посмотреть примерные параметры регуляторов тока для разной частоты ШИМ. В документации сказано, что коэффициент усиления пропорционального канала можно увеличить в 1,5 раза с аналогичным расширением полосы пропускания, но при этом на перерегулирование при скачке задания достигает величины примерно 12,5%.

Таблица 2.4 – Примерные параметры регуляторов тока

Частота ШИМ, кГц	Время опроса в регуляторе тока, мксек	Полоса пропускания, Гц	Задержка, мксек
3	167	Будет определена	1160
4	125	Будет определена	875
6	83	Будет определена	81
8	125	Будет определена	625
12	83	Будет определена	415
16	125	Будет определена	625

Коэффициент интегрального усиления (коэффициент усиления интегрального звена) (Pr 4.14) настраивается из следующего соотношения:

$$\text{Pr 4.14} = K_i = \frac{K_p \cdot 256 \cdot T}{\tau_m},$$

где τ_m – электромагнитная постоянная времени двигателя (L / R);

R – сопротивление одной фазы статорной обмотки.

Следовательно:

$$\begin{aligned} \text{Pr 4.14} = K_i &= \frac{K \cdot L \cdot \text{Номинальный ток привода} \cdot 256 \cdot 167 \text{ мс} \cdot R}{L} = \\ &= 0,0427 \cdot K \cdot R \cdot \text{Номинальный ток привода} \end{aligned}$$

По этой формуле коэффициент интегрального усиления получается с некоторым запасом. В некоторых системах, если необходима работа асинхронных двигателей, например в высокоскоростном режиме, что требует от опорной системы координат очень точно в реальном времени отслеживать, можно существенно увеличить значение коэффициента интегрального усиления.

Как уже указывалось, привод компенсирует изменения частоты ШИМ, Это позволяет обеспечить неизменные характеристики при изменении частоты ШИМ. В следующей таблице можно пронаблюдать взаимосвязь между разными значениями коэффициентов усиления пользователя и значениями, фактически используемыми в преобразователе частоты Unidrive SP. Конечно, в регуляторе тока могут использоваться и другие масштабирующие коэффициенты, однако эти величины можно использовать для сравнения между частотами ШИМ. Например: Уровень акустического шума, обычно зависит от произведения коэффициентов пропорционального усиления регулятора скорости и регулятора тока. Величины из этой таблицы можно использовать совместно с коэффициентом пропорционального усиления контура скорости для оценки уровня акустического шума, который может быть создан из-за “дребезга” сигнала скорости с энкодера для каждого изделия и для каждой частоты ШИМ. Ниже приведена таблица для Unidrive SP.

Таблица 2.5 – Сопоставление частоты ШИМ с коэф. усиления регулятора

Частота ШИМ, кГц	Коэффициент пропорц. усиления	Коэффициент интеграл. усиления
3	Pr 4.13	Pr 4.14
4	Pr 4.13·1,5	Pr 4.14
6	Pr 4.13·2	Pr 4.14
8	Pr 4.13·2	Pr 4.14·1,3
12	Pr 4.13·2,6	Pr 4.14·1,3
16	Pr 4.13·2	Pr 4.14·1,3

Теперь перейдём непосредственно к самому процессу автоматической идентификации. Для того чтобы запустить автонастройку необходимо перевести параметр (Pr.) 5.12 в значение «1».

Принцип работы описан ниже:

- Тест с неподвижным ротором, как и в скалярном управлении, измеряет сопротивление статора (Pr 5.17)
- Это значение соответственно Pr 5.17 записывается в ЭППЗУ.
- Изначально при тесте с неподвижным ротором измеряется переходная индуктивность (Pr. 5.24) по окончании теста в коэффициенты усиления контура тока (Pr. 4.13 и Pr. 4.14) записываются значения, полученные по формулам, которые содержатся в меню №4, (которые подробно описаны в начале пункта 2.1.2.1).

Про получение относительно точного значения φ_1 , также зафиксировано в меню №4. Угол можно получить по данным сопротивления статора и переходной индуктивности, чтобы настроить пределы тока и уровень потока двигателя.

- Все данные: Pr. 4.13, Pr. 4.14 и Pr. 5.24 записываются в ЭППЗУ.

Далее приведём осциллограммы переходных процессов

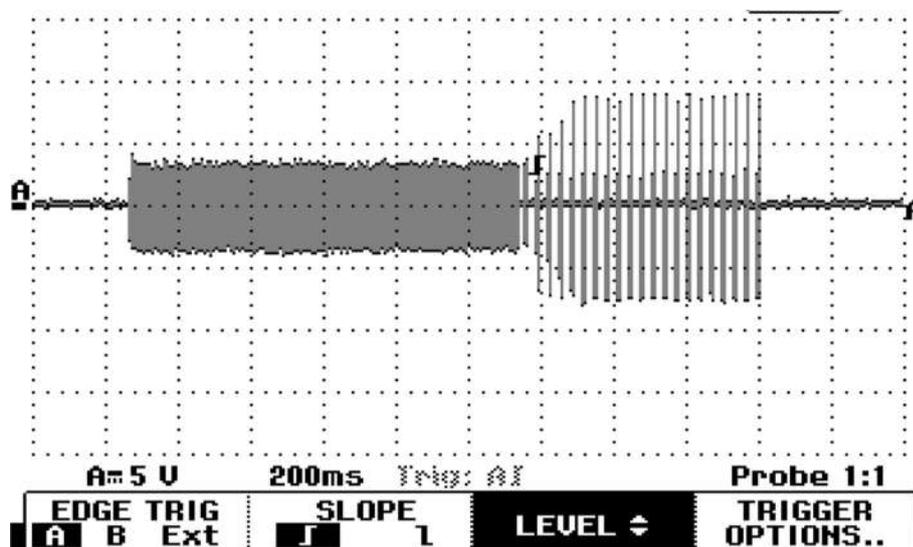


Рисунок 2.6 – Линейное напряжение на статоре

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

37

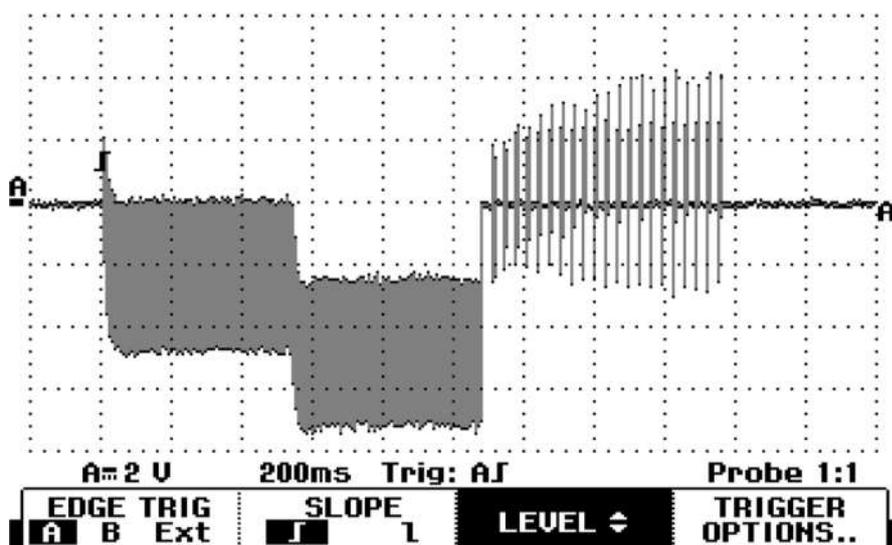


Рисунок 2.7 – Ток статора

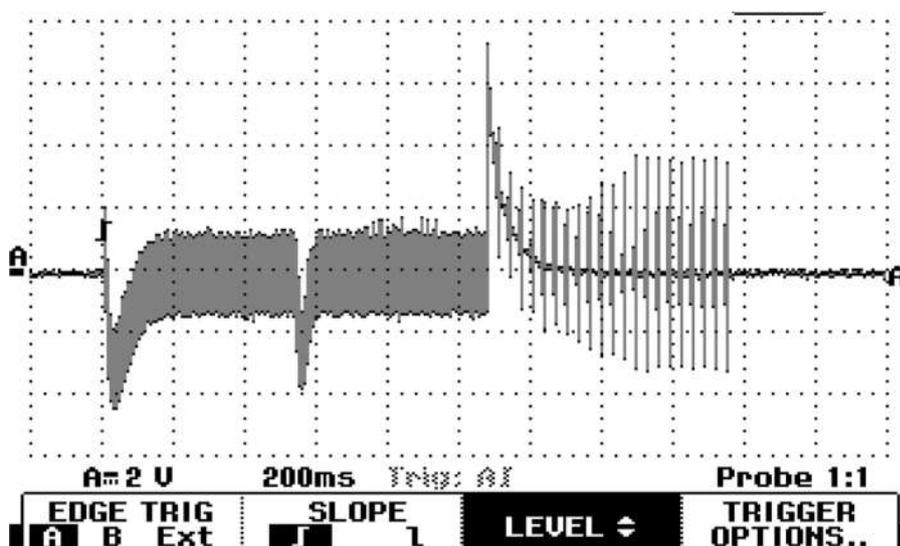


Рисунок 2.8 – Ток ротора

Внешний вид осциллограмм переходных процессов, в общем, повторяет соответствующие осциллограммы, полученные при исследовании скалярного управления.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

38

Далее приведём осциллограммы переходных процессов:

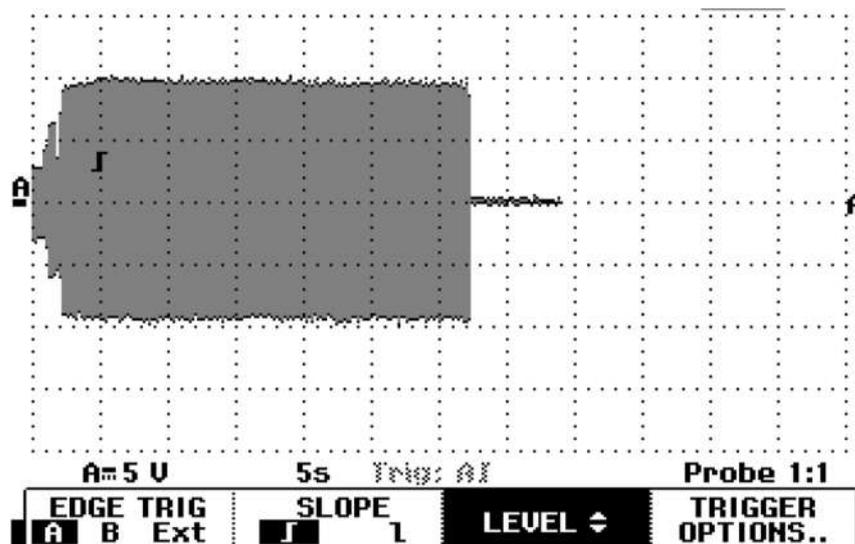


Рисунок 2.9 – Линейное напряжение статора

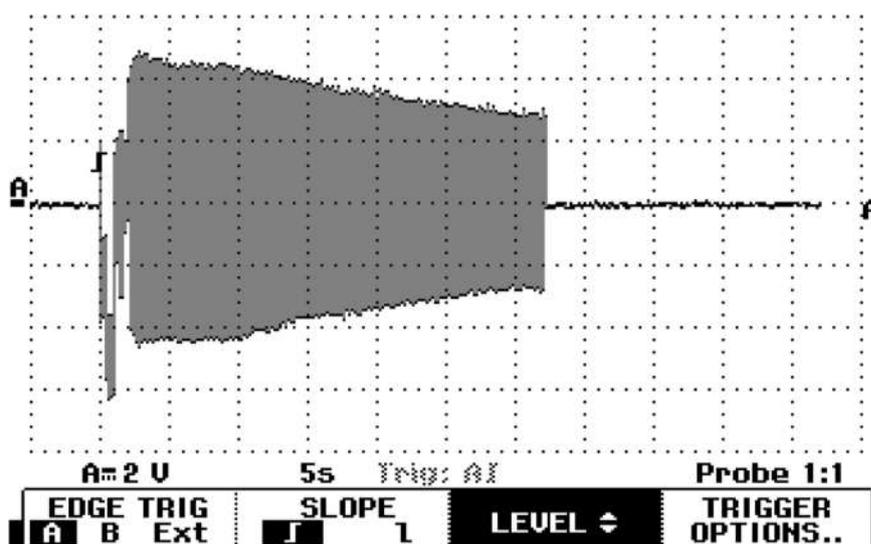


Рисунок 2.10 – Ток статора

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

40

Таблица 2.6 – Параметры синхронного двигателя БМЗ – 4,5/4 – М1

Наименование	Ед. измерения	Значение
Номинальная мощность	кВт	4,5
Напряжение статора (номинальное)	В	230
Ток статора	А	11,3
Частота вращения ротора	об/мин	1500
Ток возбуждения номинальный (при $\cos\phi = 0,8$)	А	11
Момент максимальный	Нм	85
Момент инерции ротора	кг·м ²	0,225
Кпд (при $\cos\phi = 0,8$)	%	74,2
$\cos\phi$		0,73
Сопротивление фазы статора активное		0,725
Сопротивление статора продольное синхронное	Ом	1,5
Сопротивление статора поперечное синхронное		1

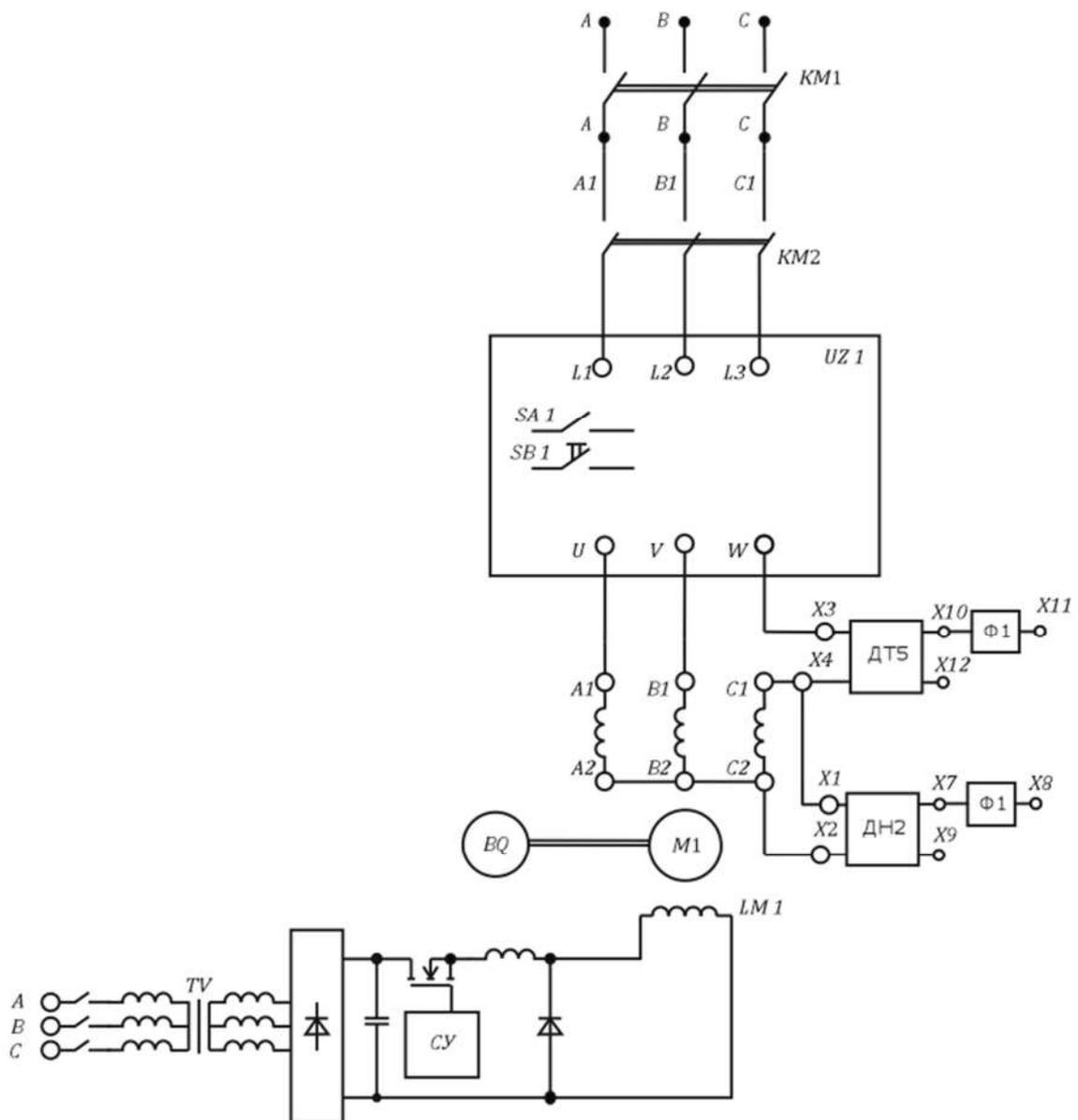


Рисунок 2.12 – Функциональная схема силовых цепей и подключения датчиков при снятии опытных данных для режима следящего ЭП векторного управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

43

Для случая замкнутого синхронного электропривода преобразователь частоты Unidrive SP имеет шесть типов автоматических настроек: короткий тест малой скорости, нормальный тест малой скорости, измерение момента инерции, тест с неподвижным ротором только для настройки коэффициентов усиления регуляторов, тест фазировки с минимальным перемагничиванием, вычисление только коэффициентов усиления регуляторов тока. Рассмотрим самые популярные из них:

2.2.1 Короткий тест малой скорости

Для того чтобы запустить автонастройку преобразователя в данном режиме необходимо перевести параметр (Pr.) 5.12 в значение «1». Принцип работы описан ниже:

Двигатель вращается на 2 электрических оборота (количество механических оборотов зависит от числа пар полюсов электрической машины) в двигательном режиме. Во время теста система управления преобразователя подает сигнал приводу на выдачу на двигатель номинального тока и измеряет только фазовый угол энкодера (Pr 3.25). Фазовый угол – это угол смещения показаний энкодера относительно положения угла главного потокосцепления. Ввиду жесткой связи между энкодером и ротором электродвигателя данный угол в абсолютном значении также равен углу между потокосцеплениями статора и ротора. Важным моментом является измерение фазового угла при остановке двигателя в конце теста, поэтому для правильной идентификации нагрузка на валу двигателя должна отсутствовать. Этот тест занимает примерно 2 секунды и его следует использовать, только если ротор принимает устойчивое положение за короткое время. После данной процедуры фазовый угол Pr 3.25 записывается в ЭППЗУ. Далее приведём осциллограммы переходных процессов.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		44

Как видно из осциллограммы преобразователь выдал на электропривод два периода токового сигнала, после чего некоторое время подавал постоянное напряжение с целью удержания ротора. Очевидно, что данный алгоритм является основополагающим и без него невозможна дальнейшая корректная работа электропривода.

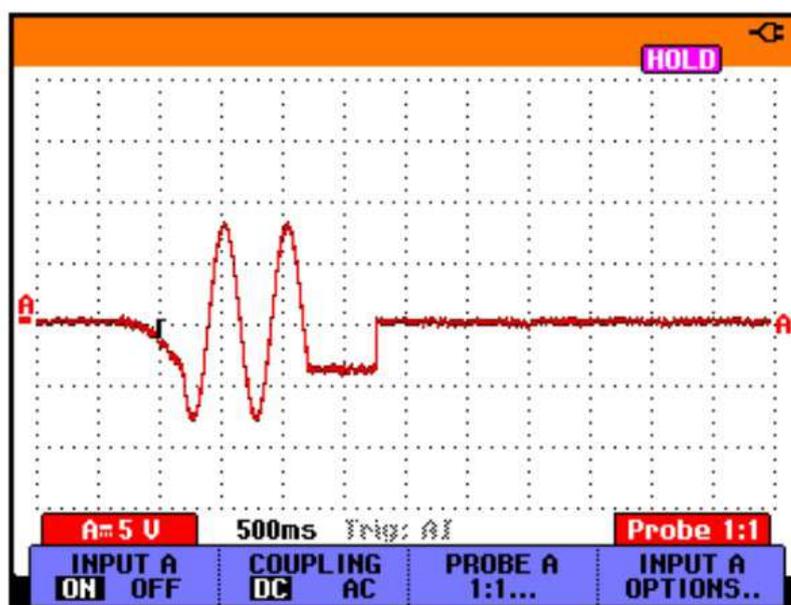


Рисунок 2.13 – Ток статора при настройке контура тока замкнутого синхронного электропривода

Контур регулирования тока в данном приводе настраивается не на максимальное быстродействие, как это наблюдается в других приводах, возможно, это связано с механической частью – такой подход позволяет настроить систему максимально снизить риск опасности причинения вреда механической части сервопривода при пусках.

2.2.2 Нормальный тест малой скорости

Для того чтобы запустить автонастройку преобразователя в данном режиме необходимо перевести параметр (Pr.) 5.12 в значение «2». Принцип работы описан ниже:

В этом случае двигатель также вращается на 2 электрических оборота (до 2 механических оборотов), как при предыдущем режиме в направлении вперед. Во время теста привод подает на двигатель номинальный ток и измеряет фазовый угол энкодера (Pr 3.25). Измерения фазового угла проводятся при остановке двигателя в конце теста, поэтому для правильного измерения фазового угла двигателя должен быть не нагружен.

Pr 3.25 записывается в ЭППЗУ.

Выполняется тест с неподвижным ротором для измерения сопротивления двигателя (Pr 5.17).

Pr 5.17 записывается в ЭППЗУ.

Выполняется тест с неподв. ротором для измерения индуктивности двигателя (Pr 5.24). После выполнения теста в память заносятся коэффициенты усиления контура тока (Pr 4.13 и Pr 4.14), рассчитанные по формулам Меню 4. Нужно отметить, что здесь измеряется индуктивность только по оси потока. Это значит, что у многих двигателей она будет на 20-30% меньше, чем индуктивность по другой оси. При необходимости индуктивность по другой оси можно использовать для расчета коэффициента пропорционального усиления регулятора тока, поскольку нет переходных изменений текущей опорной оси потока. Поэтому при необходимости пользователь может увеличить коэффициент усиления.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		46

- Индуктивность по другой оси можно использовать для оптимальной компенсации поперечной связи (Pr 5.26. Данный параметр, если установлен в «1», разрешает функцию непрерывной автонастройки. Т.е. система постоянно отслеживает пульсации тока и подстраивает параметры контура тока на оптимальную производительность (Pr 5.15, Pr 4.13 и Pr 4.34). Однако автонастройку при пуско-наладке всё равно необходимо произвести, так как непрерывная автонастройка не подстраивает интегральный коэффициент Pr 4.14 для непрерывного тока. Если активируется контур ЭДС, расчёт коэффициентов усиления прекращается, значит при ослаблении поля возбуждения коэффициенты не увеличиваются. Важно знать, что если схема электропривода собрана в 12-пульсную схему, функция работать не будет.

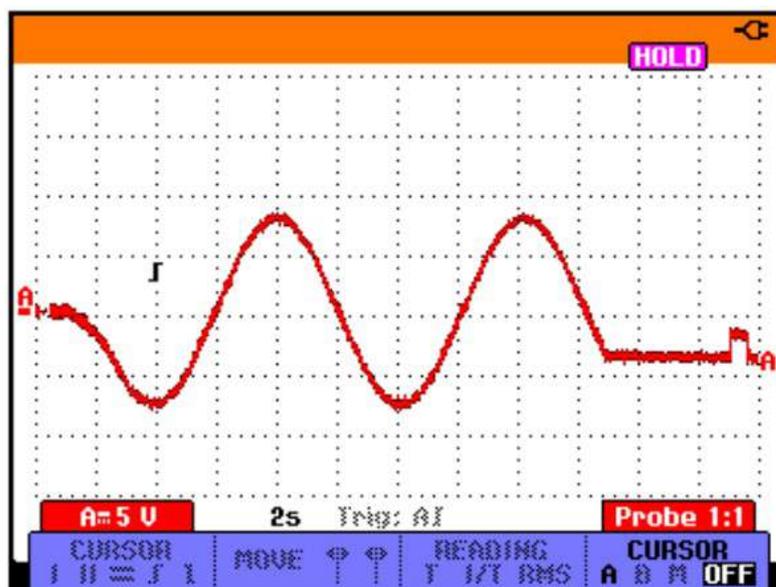


Рисунок 2.14 – Ток статора синхронного двигателя

- Pr 4.13, Pr 4.14 и Pr 5.24 записываются в ЭППЗУ. Весь тест занимает около 20 секунд, его можно использовать с двигателями, которым нужно время для возвращения в состояние покоя после перемещения ротора. При измерении индуктивности привод подает в двигатель импульсы тока, создающие поток, противоположный потоку от постоянных магнитов. Максимальный подаваемый ток равен четверти от номинального тока ((Pr 5.07 или Pr 21.07)). Конечно, ток не может повредить магниты, однако уровень тока может несколько размагнитить магниты, Чтобы исключить пагубное воздействие теста надо выставить меньшее значение номинального тока.

С сервомотором, в котором нет абсолютного энкодера для управления (то есть инкрементный без коммутационных сигналов UVW, SINCOS без порта связи и т.п.), можно использовать короткий или нормальный тест малой скорости. Тест фазировки следует выполнять после каждого включения питания или отказа питания энкодера, если мотор вращается при отсутствии питания, и только затем привод может управлять двигателем. Если используется такой метод управления, то привод не может выполнить проверок ошибок, чтобы убедиться, что абсолютное положение не было потеряно из-за ложных импульсов энкодера, обусловленных влиянием помех.

2.3 Авто настройка двигателя постоянного тока с тиристорным преобразователем Mentor MP фирмы Control Techniques

Для дальнейшего повествования в качестве ознакомительных данных приведём данные двигателя и ТП.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		48

Таблица 2.7 – Параметры двигателя независимого возбуждения ПЗ2

Наименование	Ед. измерения	Значение
Номинальная мощность	кВт	2,2
Напряжение якоря номинальное	В	2200
Ток якоря номинальный	А	12,2
Частота вращения ротора	об/мин	1500
Ток возбуждения	А	0,49
Момент максимальный	Нм	85
Момент инерции ротора	кг•м ²	0,029

Таблица 2.8 – Параметры ТП Mentoe MP25R

Наименование	Ед. измерения	Значение
Номинальная мощность	кВт	7,5
Номинальное входное напряжение	В	380...480
Максимальный входной ток	А	21
Диапазон выходных напряжений	В	0,1...400
Диапазон выходных частот	Гц	0,1...300
Постоянный ток на выходе (max)	А	25

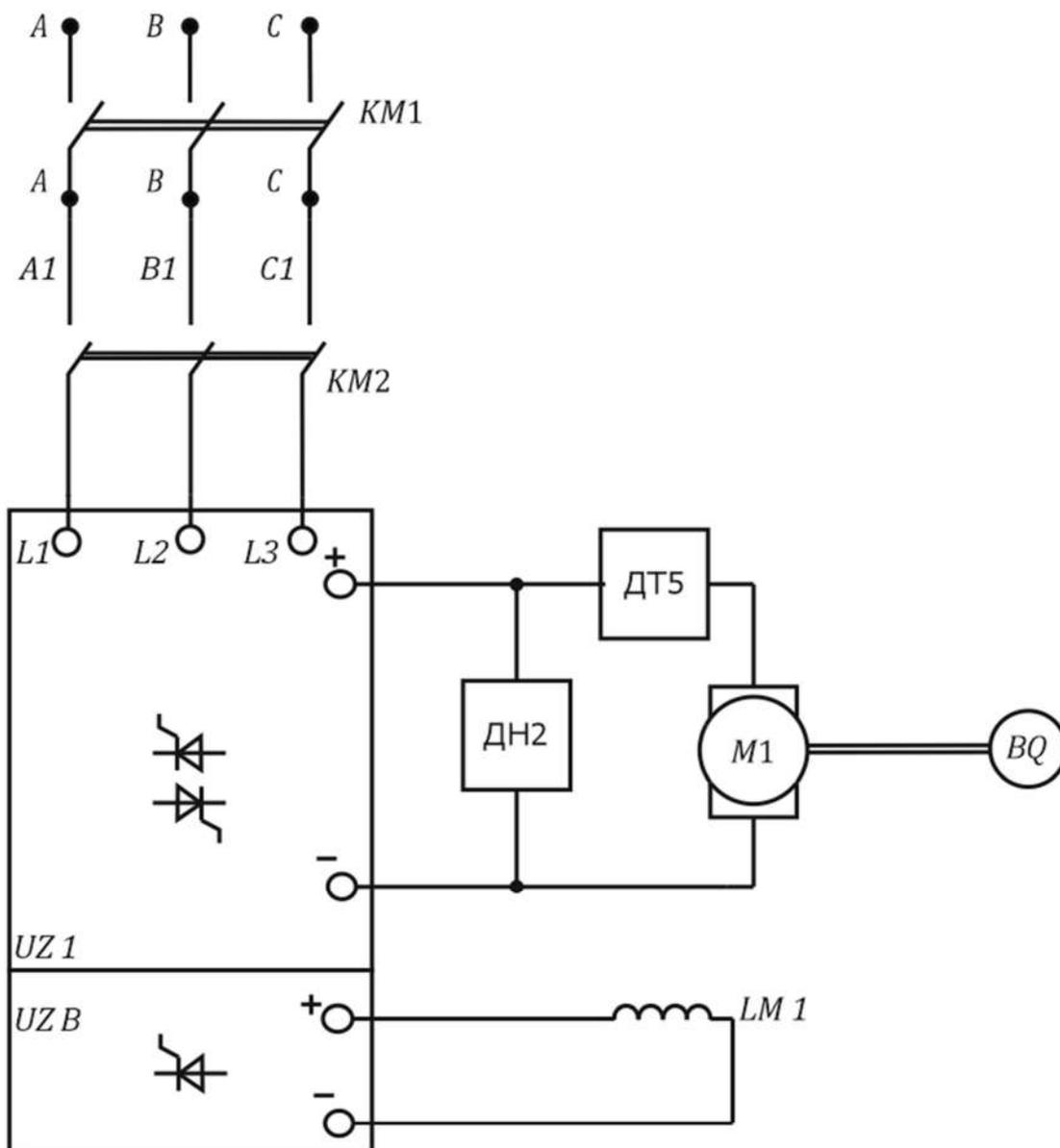


Рисунок 2.15 – Функциональная схема силовых цепей и подключения датчиков при снятии опытных данных электропривода постоянного тока

Если параметр 5.12 не равен нулю и подан сигнал разрешения работы, то при подаче команды работы (хода) в любом направлении электропривод выполняет тест автонастройки. Все тесты, выполняемые с вращением вала двигателя, выполняются в направлении вперед, если $Pr\ 1.12 = 0$ или назад, если $Pr\ 1.12 = 1$. Например, если тест запущен подачей команды хода назад ($Pr\ 6.32 = 1$), то тест выполняется в направлении назад.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

50

Тест не запустится, пока электропривод не будет включен до запуска теста подачей команды включения или работы, то есть он не запустится, если электропривод в состоянии останова. Нельзя перейти в состояние останова, если Pr 1.12 не равен нулю. После успешного завершения теста электропривод выключается и входит в состояние запрета. Двигатель можно запустить, только если убрать команду разрешения либо со входа разрешения, либо сбросить Pr 6.15 в 0, либо из слова управления (Pr 6.42), если оно активно. После выполнения этой процедуры для запуска двигателя необходимо снова включить разрешение на работу (Pr 6.15 = 1) [13].

2.3.1 Статическая автонастройка параметров контура тока

Для того чтобы запустить автонастройку преобразователя в данном режиме необходимо перевести параметр (Pr.) 5.12 в значение «1». Принцип работы описан ниже [13]:

После выполнения этой операции электропривод для выбранного двигателя вычислит следующие параметры и сохранит эти результаты:

- а) Постоянная двигателя (Pr 5.15)
- б) Коэффициент усиления K_p непрерывного тока (Pr 4.13)
- в) Коэффициент усиления K_i непрерывного тока (Pr 4.14)
- г) Коэффициент усиления K_i прерывистого тока (Pr 4.34)
- д) Уставка против ЭДС (Pr 5.59)
- е) Сопротивление якоря (Pr 5.61)
- ж) Коэффициент усиления K_i контура потока (Pr 5.72)

Далее приведём осциллограммы переходных процессов:

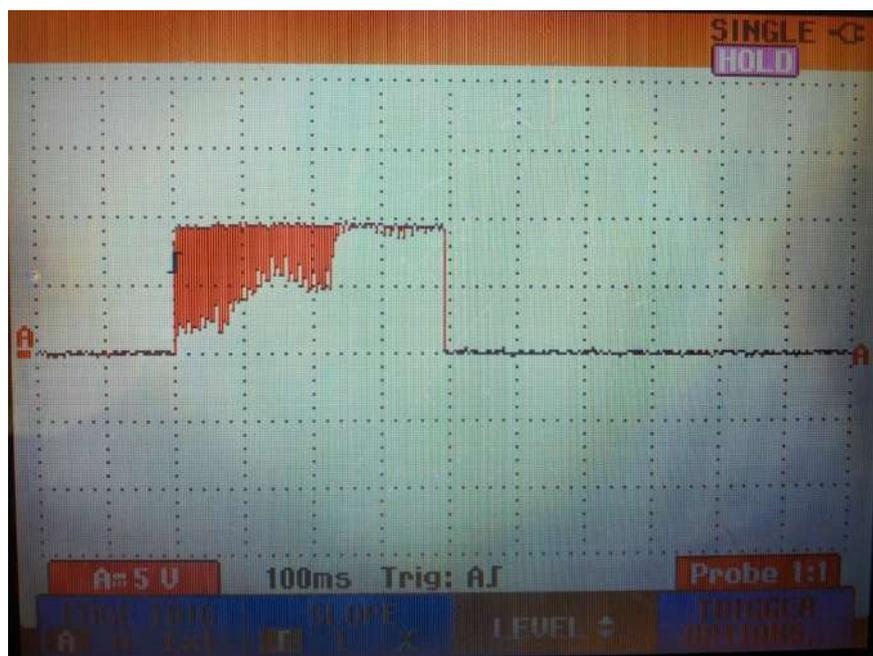


Рисунок 2.16 – Осциллограмма тока цепи якоря

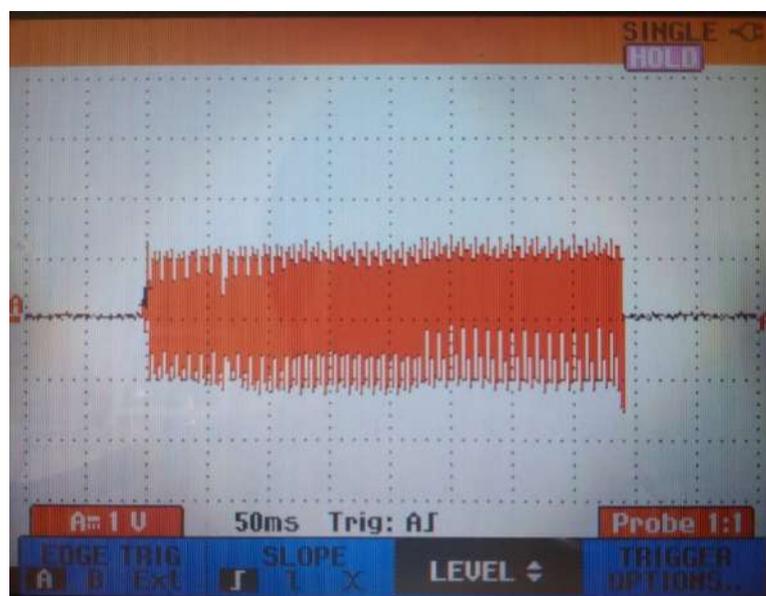


Рисунок 2.17 – Осциллограмма напряжения цепи якоря

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

52

По виду переходных процессов можно сделать вывод, что при настройке система подаёт ток разной частоты, что повторяет алгоритмы частотного анализа в электроприводах, вместе с этим напряжение остаётся неизменным, следовательно, можно сказать, что сопротивление якоря определяется методом вольтметра – амперметра. При подаче на вход тока разной частоты определяется полоса пропускания системы, а затем определяется индуктивность.

2.3.3 Автонастройка параметров контура скорости с вращением вала

Для того чтобы запустить автонастройку преобразователя в данном режиме необходимо перевести параметр (Pr.) 5.12 в значение «3». Принцип работы описан ниже [13]:

а) Привод разгоняется в прямом направлении до скорости, равно 75% от номинала, затем останавливается. В случае с несколькими запусками настройки, производитель рекомендует начинать с момента равному 1/16 от номинала, затем 1/8, 1/4, 1/2, а уже потом Мном, если двигатель не может разогнаться до необходимой скорости. В случае с первыми четырьмя значениями момента разгон должен происходить за 5 секунд, с последним – 60 секунд. Если тест пройдет успешно, время ускорения торможения и ускорения используется для расчёта инерционности двигателя и нагрузки. Оно записывается в Pr 3.18

б) Pr 3.18 сохраняется в ЭСППЗУ

Расчётное значение момента инерции зависит от значения крутящего момента двигателя на ампер (Pr 5.32). Если в данном тесте производится настройка замкнутой системы, то на контур усиления скорости Pr 5.32 не повлияет, так как в расчётах этих значений тоже используется Kt и любая точность устраняется.

Также в процессе тестирования система старается устранить влияние любой нагрузки на двигатель, естественно кроме крутящего момента, который необходим для ускорения/замедления двигателя. При условии, что средний крутящий момент во время ускорения и замедления одинаковый – значение момента инерции рассчитывается верно.

Далее приведём осциллограммы переходных процессов:

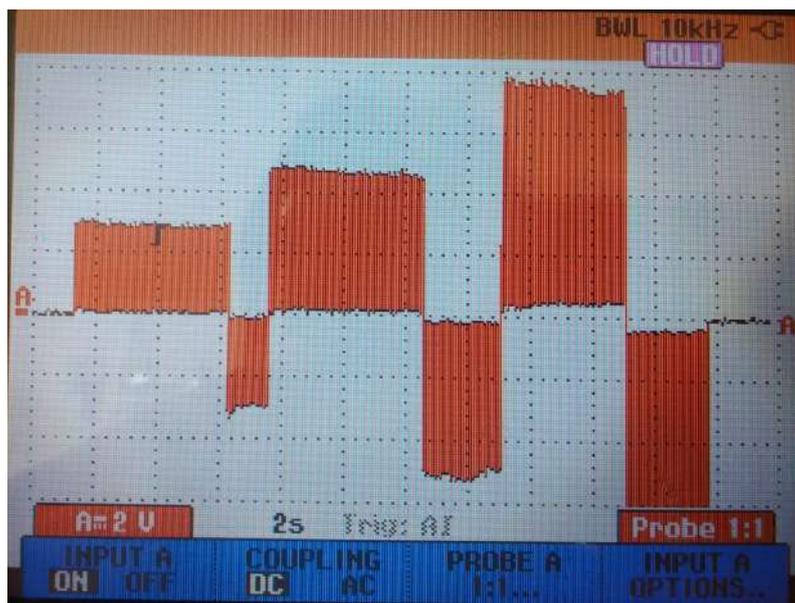


Рисунок 2.20 – Ток якорной цепи

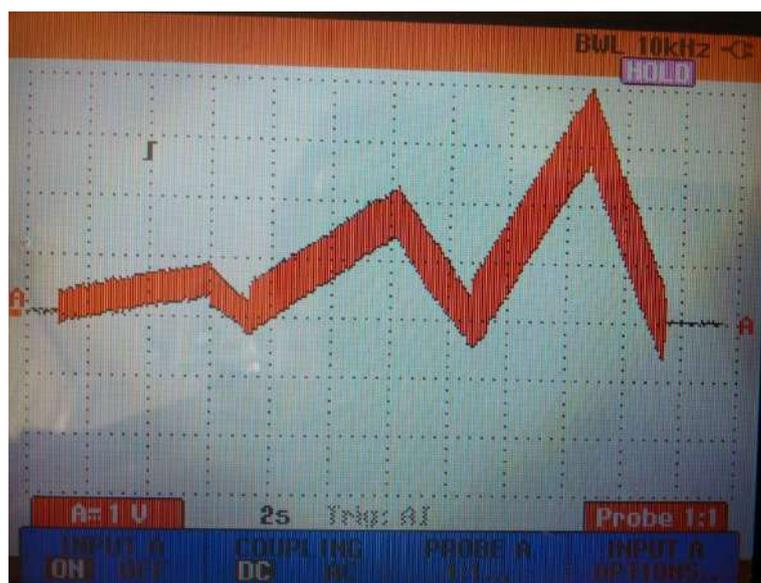


Рисунок 2.21 – Напряжение якорной цепи

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ

Лист

54

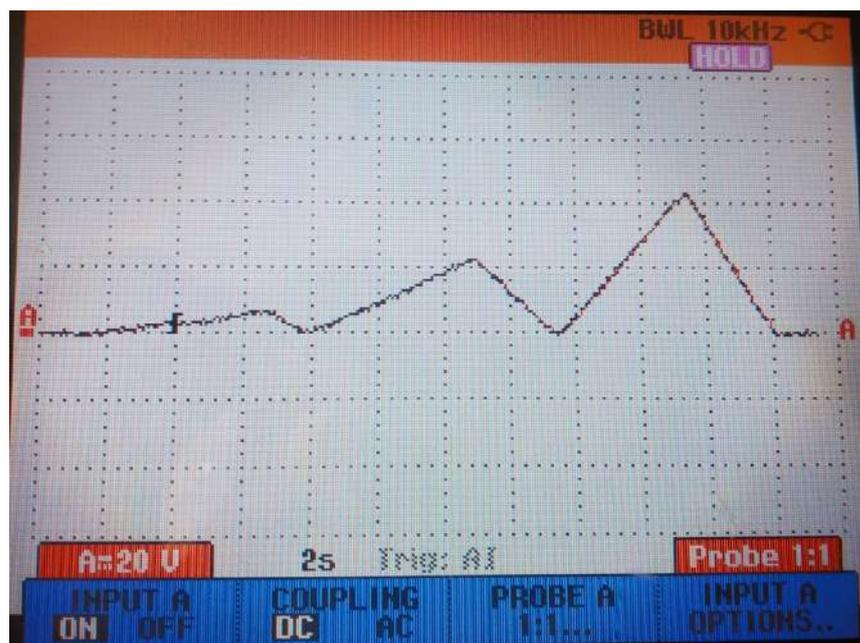


Рисунок 2.22 – Изменение скорости якоря

На якорь двигателя подаётся ток разной амплитуды и полярности, в результате таких воздействий якорь двигателя то ускоряется, то замедляется. В конечном итоге определяется момент инерции двигателя.

2.4 Авто настройка двигателя постоянного тока с тиристорным преобразователем ACS880 фирмы АВВ

2.4.1 Обычный режим

Для того чтобы запустить автонастройку необходимо перевести параметр (Pr.) 99.13 (запрос идентиф. прогона) в значение «1». Принцип работы описан ниже

Обычный идентификационный прогон. Гарантирует хорошую точность регулирования во всех случаях. Идентификационный прогон занимает около 90 секунд. Этот режим следует выбирать всегда, когда это возможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В автонастройке нуждаются все типы современного регулируемого электропривода. В дипломной работе показано, что методы автоматической идентификации систем электропривода позволяют снизить время, затраченное на ввод в эксплуатацию нового оборудования, что делает работу наладчика более эффективной.

По изложенному материалу в дипломной работе можно сделать вывод, что реальные алгоритмы автоматической настройки совпадают с имеющимися на данный момент теоретическим исследованиям по данному вопросу. Экспериментальное исследование алгоритмов автоматической настройки в разных типах электроприводах показало, что способы идентификации довольно близки между собой, в частности методы поиска обмоточных данных машины. Стоит отметить, что контур регулирования тока настраивается по более сложным законам, чего нельзя сказать о контуре регулирования скорости (можно объяснить это тем, что настройка данного контура требует вращения вала – что не всегда возможно).

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		57

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1) Водовозов А. М. Идентификация параметров асинхронной машины в установившихся режимах / А. М. Водовозов А. С. Елюков // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. №1. – с. 1-3.

2) Гаргаев А. Н. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью поисковых методов / А. Н. Гаргаев, В. Г. Каширинских // Электротехнические комплексы и системы. – 2001. – №1. – с. 131-134.

3) Гаргаев А. Н. Идентификация параметров двигателей постоянного тока с помощью метода роя частиц / А. Н. Гаргаев, В. Г. Каширинских // Электротехнические комплексы и системы. – 2001. – №1. – с. 71-74.

4) Тимошкин В.В. Метод идентификации параметров электродвигателей / В.В. Тимошкин, А. С. Глазырин, Т. А. Глазырина // Современные техника и технология. Секция 4. – 2017. – с. 397-398.

5) Золотухин Ю. Н. / Идентификация параметров поля для подавления пульсаций момента синхронного двигателя с постоянными магнитами Ю. Н. Золотухин., А. А. Нестеров // Российская академия наук, сибирское отделение, автотехника. – 2006. – том 42, №2. – с. 4-9.

6) Жерве, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1984. – 408 с.

7) Экспериментальное исследование алгоритмов автоматической настройки контуров тока электроприводов А. В. Александров, Е. А. Кузнецова, С. Д. Омельченко и др. // Вестник ЮУрГУ. – 2020. – Т.8, №1. – с. 8-13.

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.0173</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		58

8) Макаров В.Г. Анализ состояния и перспективы развития работ по идентификации параметров электрических машин / В.Г. Макаров, Ю. А. Яковлев // КГТУ. – 2008. – с. 134-144.

9) Терёхин А. А. Обзор способов идентификации параметров асинхронного электропривода / А.А. Терёхин, Д. А. Даденков // Вестник ПНИПУ. – Электротехника №22. – 2017. – с. 55-65

10) Приступа Д.Л. Идентификация электрических параметров асинхронных двигателей при самонастройке векторно-управляемых электроприводов: дис. канд. техн. наук / Д. Л. Приступа. – Киев.: Изд-во Политехника, 2016. – 196 с.

11) Control Techniques. Расширенное руководство пользователя Unidrive SP / Control Techniques – http://www.control-pro.ru/doc_html/unidrive_sp.htm (дата обращения 02.05.2020)

12) Флоров, Ю. М. Шелякин В. П. Регулируемый асинхронный электропривод. / Ю.М. Флоров, В. П. Шелякин. – СПб.: Лань, 2016. – 464 с.

13) Control Techniques. Расширенное руководство пользователя Mentor MP / Control Techniques. – <https://www.control-techniques.com/docs/2> (дата обращения 16.05.2020).

14) Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов, и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 265с.

15) Jacek F. Gieras. Permanent Magnet Motor Technology / Jacek F. Gieras, Mitchell Wing. – <https://ru.calameo.com/books/0001935748f9998c96dcb> (дата обращения 01.06.2020)

					<i>ЮУрГУ-13.03.02.2020.049.01ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпис</i>	<i>Дата</i>		59