

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»
Администрация Правительства Кузбасса
Администрация г. Новокузнецка
Институт проблем управления им. Трапезникова РАН
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН
АНО «Научно-образовательный центр «Кузбасс»**

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2022**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
(с международным участием)**

15-16 декабря 2022 г.

**Новокузнецк
2022**

УДК 658.011.56
С 409

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф. В.В. Зимин (ответственный редактор),
д.т.н., проф. С.М. Кулаков, д.т.н., проф. В.Ю. Островляничик,
д.т.н., проф. Л.Д. Павлова, д.т.н., доц. И.А. Рыбенко,
к.т.н., доц. В.И. Кожемяченко (технический редактор).

С 409 Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2022: труды Всероссийской научно–практической конференции (с международным участием), 15-16 декабря 2022 г. / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Сибирский государственный индустриальный университет ; под общ. ред. В.В. Зимина. – Новокузнецк : Издательский центр СибГИУ, 2022. – 632 с.

ISBN 978-5-7806-0583-6

Труды конференции посвящены научным и практическим вопросам в области современных систем автоматизации и информатизации учебных, исследовательских и производственных процессов. Представлены результаты исследования, разработки и внедрения методического, математического, программного, технического и организационного обеспечения систем автоматизации и информационно-управляющих систем в различных сферах деятельности.

Сборник трудов ориентирован на широкий круг исследователей, научных работников, инженерно-технический персонал предприятий и научно-исследовательских лабораторий, преподавателей вузов, аспирантов и обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры.

УДК 658.011.56

© Сибирский государственный
индустриальный университет, 2022

4. Шабанов, В. А. О законах частотного регулирования синхронных двигателей на нефтеперекачивающих станциях / В. А. Шабанов, О. В. Кабаргина // Электронный научный журнал нефтегазовое дело. – 2010. – № 2. – 5 с.
5. Finch, J. W. Controlled AC electrical drives / J.W. Finch, D. Giaouris // IEEE Transactions on Industrial Electronics, March 2008. – Vol. 55, No. 2. – P. 481-491.
6. Электропривод современных шахтных подъемных машин / Л. Х. Дацковский, В. И. Роговой, И. С. Кузнецов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2010. – № 3-2. – С. 157-165.
7. Вейнгер, А. М. Регулируемый синхронный электропривод / А. М. Вейнгер. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 224 с. : ил.
8. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием : учебник / Г. Г. Соколовский. – Москва : Академия, 2006. – с. 265.
9. Слежановский, О. В. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 256 с. : ил.
10. Кузнецов, В. А. Имитационное моделирование системы автоматического управления главным электроприводом прокатного толстолистового стана по системе «частотный преобразователь – синхронный двигатель» / В. А. Кузнецов, Н. С. Зайцев, Е. С. Кузнецова // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, 25-26 ноября 2020. – Новокузнецк : изд-во СибГИУ, 2020 г. – С. 32 – 40.

УДК 621.313.333.1

СИНТЕЗ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Островляничик В.Ю., Маршев Д.А., Кубарев В.А., Поползин И.Ю.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

ООО «НИИ АЭМ СибГИУ»

г. Новокузнецк, Россия, niiaep@kuz.ru

Аннотация. В статье рассматривается вопрос синтеза адаптивного управления магнитным потоком статора асинхронного двигателя. Необходимость в таком управлении возникает при использовании асинхронных двигателей для привода механизмов, нуждающихся в большом диапазоне регулирования скорости (в частности, шахтных и рудничных подъемных установок). На основании рассмотрения структурной схемы цепи статора машины произведен синтез адаптивного регулятора магнитного потока и разработано его математическое описание.

Ключевые слова: асинхронный двигатель с фазным ротором, магнитный поток, адаптивный регулятор, разделение зон управления, частотное управление.

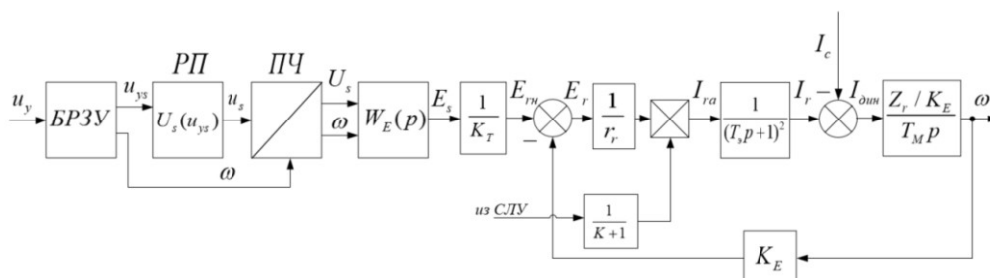
Abstract. The article deals with the issue of synthesis of adaptive control of the magnetic flux of the stator of an induction motor. The need for such control arises when using asynchronous motors to drive mechanisms that need a wide range of speed control (in particular, mine and mine hoists). Based on the consideration of the block diagram of the stator circuit of the machine, an adaptive magnetic flux controller was synthesized and its mathematical description was developed.

Keywords: wound-rotor induction motor, magnetic flux, adaptive controller, separation of control zones, frequency control.

Все изложенное в [1] верно для асинхронного двигателя с постоянным магнитным потоком. Однако, магнитное поле ротора при вращении уменьшает результирующий магнитный поток. Кроме того, при реализации управления, при котором происходит изменение частоты статора со значительным изменением реактивных сопротивлений, не учитываются зависимость тока намагничивания, а, следовательно, и потока возбуждения элект-

трической машины от внутренних возмущающих воздействий. Поэтому для поддержания магнитного потока необходимо реализовать частотный преобразователь статора, с использованием астатического регулятора вращающегося магнитного потока статора.

Для синтеза регулятора потока рассмотрим структурную схему с включённым преобразователем на входе [2], представленную на рисунке 1.

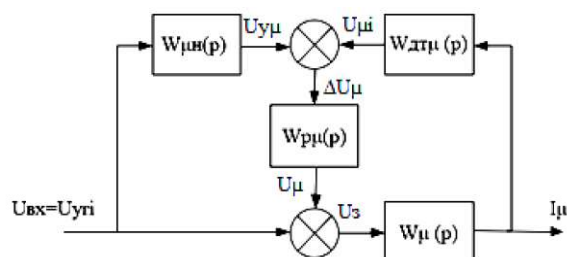


u_y – управляющий сигнал; БРЗУ – блок разделения зон управления; ПЧ – преобразователь частоты; РП – регулятор потока; $W_E(p)$ – передаточная функция ЭДС статора; $U_s(\omega)$ – напряжение преобразователя частоты, $U_s = U_m e^{-j\omega t}$; $\Phi = f(I_\mu)$ – магнитный поток статора

Рисунок 1 – Функциональная структурная схема АДФР с преобразователем частоты статора, регулятором потока и блоком разделения зон управления

При синтезе воспользуемся принципом реализации адаптирующих воздействий, основанным на использовании условных отрицательных обратных связей с нелинейным астатическим звеном [3]. Применение интегрирующего звена в канале условной отрицательной обратной связи позволяет реализовать астатическое регулирование.

Параметры адаптирующего регулятора могут быть определены на основе анализа процесса адаптации, который возникает в случае несоответствия сигналов на выходе наблюдателя и выходной величины. Для этого случая на рисунке 2 представлена эквивалентная структурная схема, которая является исходной для синтеза регулятора потока.



$W_{\mu n}(p)$ – передаточная функция для тока намагничивания двигателя при номинальных напряжении и частоте статора. Выполняет функцию наблюдателя;

$W_{\mu i}(p)$ – передаточная датчика тока намагничивания; $W_{p\mu}(p)$ – передаточная функция регулятора тока намагничивания; $W_\mu(p)$ – передаточная функция контура намагничивания. Выполняет функцию объекта управления

Рисунок 2 – Исходная эквивалентная структура с адаптивным регулятором и наблюдателем.

Передаточная функция регулятора намагничивания определяется при анализе выражения:

$$W_{\mu}(p) = \frac{I_{\mu}(p)}{U_{\text{ex}}(p)} = \frac{(W_{\mu n}(p)W_{p\mu}(p) + 1)W_{\mu}(p)}{W_{\text{от}\mu}(p)W_{p\mu}(p)W_{\mu}(p) + 1} \quad (1)$$

При этом добиваются, чтобы характеристический полином передаточной функции соответствовал требованиям отсутствия колебательности системы. Определим передаточные функции всех звеньев, определяющих характеристический полином выражения (1).

Передаточная функция контура намагничивания статора:

$$W_{\mu}(p) = \frac{I_{\mu}(p)}{u_s(p)} = \frac{U_s - E_s}{Z_s} \cdot \frac{1}{T_s p + 1}, \quad (2)$$

где $u_s(p)$ – напряжение на статоре;
 $I_{\mu}(p)$ – ток намагничивания;
 U_s – действующее значение напряжения на статоре;
 E_s – действующее значение ЭДС статора;
 T_s – постоянная времени цепи статора.

Передаточную функцию датчика тока намагничивания возможно представить на основании баланса МДС, откуда следует:

$$I_{\mu} = I_s - K'_{ir} I_r \quad (3)$$

и

$$W_{\text{от}\mu}(p) = I_{\mu}(p)k_{i\mu}, \quad (4)$$

где $u_{i\mu}$ – напряжение задания тока намагничивания;
 I_{μ} – ток намагничивания двигателя;
 I_r – ток ротора двигателя;
 K'_{μ} – коэффициент приведения тока ротора;
 I_r – приведенный ток ротора двигателя.

$W_{\mu n}(p)$ – передаточная функция для тока намагничивания двигателя при номинальных напряжении и частоте статора. Выполняет функцию наблюдателя. Передаточная функция наблюдателя определяется передаточной функцией объекта управления при фиксированном значении наблюдаемой величины. В нашем случае это параметры контура намагничивания соответствующие номинальному току намагничивания.

В нашем случае номинальный ток намагничивания определяется приведением уровня сигнала задания к уровню сигнала номинального значения тока намагничивания, и является пропорциональным звеном:

$$W_{\mu n}(p) = \frac{u_{y\mu}(p)}{u_{ys}(p)} = K_{\mu}, \quad (5)$$

где u_s – сигнал управления напряжением статора;
 $u_{y\mu}$ – сигнал задания тока намагничивания;

$$K_{\mu} = \frac{u_{yn}}{u_{sn}}$$

u_{yn} – коэффициент передачи канала управления магнитным потоком;
 $u_{уином}$ – уровень сигнала управления, соответствующий номинальному току намагничивания.

Подставив выражение передаточных функций (2,3,4,5) в (1) и проанализировав полученное выражение для характеристического полинома передаточной функции, придем к выводу, что для рассматриваемого случая регулятор тока намагничивания будет иметь вид интегрирующего звена:

$$W_{\delta\mu}(p) = (u_{\delta\mu} - u_{i\mu}) \frac{1}{T_o p}, \quad (6)$$

где $u_{i\mu}$ – сигнал измерения тока намагничивания;
 T_o – постоянная времени регулятора потока.

МДС контура намагничивания формируется только за счет реактивного тока, а активная составляющая, определяемая как произведение $\Delta U = I_{\mu} R_a$ в сравнении с ней мала, поэтому электромагнитная постоянная времени может быть определена как:

$$T_{\varepsilon s} = \frac{1}{\omega_s}. \quad (7)$$

Обычно при расчете по (7) выбирается минимальная частота 5÷10 Гц. При этом:

$$T_o = 3 \div 5 T_{\varepsilon s}. \quad (8)$$

Введем ограничения величин для адекватной работы регулятора. Изменение потока должно производиться при уровне сигнала задания не выше номинального значения сигнала управления током намагничивания. В этом случае можно представить систему уравнений, описывающую работу пропорционального звена номинального тока намагничивания, в следующем виде:

$$u_{y\mu} = \begin{cases} u_{ys} K_{\mu}, & 0 < u_{y\mu} < u_{y\mu n}, \\ u_{y\mu ном}, & u_{y\mu} > u_{y\mu ном}, \\ u_s K_{\mu}, & 0 > u_{y\mu} > -u_{y\mu ном}, \\ u_{y\mu ном}, & -u_{y\mu} < -u_{y\mu ном}. \end{cases} \quad (9)$$

Введем также ограничение для регулятора потока в целях исключения насыщения выходного управляющего сигнала. Тогда система уравнений, описывающая работу регулятора, будет иметь вид:

$$u_{\mu} = \begin{cases} \Delta u_{\mu} \frac{1}{T_o p}, 0 < u_{\mu} < u_{\muном}, \\ u_{u\muном}, u_{\muном} > u_{\muном}, \\ -\Delta u_{\mu} \frac{1}{T_o p}, 0 > u_{\mu} > -u_{\muном}, \\ -u_{u\muном}, -u_{\muном} < -u_{\mu}. \end{cases} \quad (10)$$

Выражения (7-10) описывают поведение выходных величин соответственно: наблюдателя – датчика номинального тока намагничивания; датчика тока намагничивания и интегрального регулятора, обеспечивающего неизменность заданного тока намагничивания. С учётом рисунка 1 и [2], получим математическую модель АДФР с преобразователем частоты и регулятором потока:

$$\begin{aligned} u_{y\mu} &= \begin{cases} u_{yS} K_{\mu}, 0 < u_{y\mu} < u_{u\muном}, \\ u_{u\muном}, u_{y\mu} > u_{u\muном}, \\ u_{yS} K_{\mu}, 0 > u_{y\mu} > -u_{u\muном}, \\ u_{u\muном}, -u_{y\mu} < -u_{u\muном}, \end{cases} \\ \Delta u_{\mu} &= u_{y\mu} - u_{i\mu}, \\ u_{i\mu} &= K_{i\mu} I_{\mu}, \\ u_{\mu} &= \begin{cases} \Delta u_{\mu} \frac{1}{T_o p}, 0 < u_{\mu} < u_{\muном}, \\ u_{u\muном}, u_{\muном} > u_{\muном}, \\ -\Delta u_{\mu} \frac{1}{T_o p}, 0 > u_{\mu} > -u_{\muном}, \\ -u_{u\muном}, -u_{\muном} < -u_{\mu}. \end{cases} \\ I_S &= I_{\mu} + I_R', \\ I_R' &= \frac{1}{K_{\mu}'} I_R, \end{aligned} \quad (11)$$

ляет реализовать принцип поддержания магнитного потока вне зависимости от частоты вращения поля;

2. предложена математическая модель асинхронного двигателя с фазным ротором, с преобразователем частоты и регулятором вращающегося магнитного потока статора, обеспечивающего максимальную перегрузочную способность и требуемое качество управления на всём диапазоне регулирования скорости. В соответствии с принципами закона Костенко была введена корректирующая связь, поддерживающая постоянство соотношения амплитуды напряжения и частоты;
3. применение данной математической модели в системе управления электроприводом позволяет обеспечить высокий энергосберегающий эффект и КПД электрической машины за счёт обеспечения независимости (инвариантности) магнитного потока статора от внешних и внутренних возмущающих воздействий.

Библиографический список

1. Исследования асинхронного электропривода с фазным ротором подъемных установок / Островляничик В. Ю., Кубарев В. А., Поползин И. Ю., Маршев Д. А. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. - 2022. - № 8. - С. 255–261.
2. Оптимизация характеристик электропривода переменного тока подъёмных установок / Островляничик В. Ю., Кубарев В. А., Поползин И. Ю., Маршев Д. А. // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. - 2022. - № 8. - С.
3. Островляничик В. Ю. Автоматический электропривод постоянного тока горно-металлургического производства / В. Ю. Островляничик. – Новокузнецк : СибГИУ, 2004. – 382 с.
4. Онищенко Г. Б. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания / Г. Б. Онищенко, И. Л. Локтева. – М.: Энергия, 1979. – 200 с.
5. Хватов С. В. Проектирование и расчет асинхронного вентильного каскада [Текст] / С. В. Хватов, В. Г. Титов. – Горький: ГГУ им. Н. И. Лобачевского, 1977. – 91 с.
6. Долганов А. В. Стационарные машины / А. В. Долганов. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2017. – 281 с.
7. Шахтный подъем / В. Р. Бежок, В. И. Дворников, И. Г. Манец, В. А. Пристром; под общ. ред. Б. А. Грядущего и В. А. Корсуна. – Донецк : ООО «Юго-Восток ЛТД», 2007. – 624 с.
8. Руководство по ревизии и наладке шахтных подъемных установок / В. Р. Бежок, В. Г. Калинин, В. Д. Коноплянов, Е. М. Курченко; под общ. ред. В. А. Корсуна. – Донецк : Донеччина, 2009. – 672 с.
9. Понкратов А. С. Использование машины двойного питания в качестве генератора переменного тока / А. С. Понкратов, Д. Н. Мирошник // Инновационные перспективы Донбасса: материалы международной научно-практической конференции, г. Донецк, 20 – 22 мая 2015 г. Т. 2: Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем. – 2015. – С. 12 – 21.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ВЕНТИЛЯТОРНОЙ НАГРУЗКОЙ

Сарсембин А.О., Кубарев В.А., Асмаатбеков А.К.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
г. Новокузнецк, Россия, kubarev.sibsiu@list.ru

Аннотация. В настоящей работе произведён расчёт силового трансформатора, предложена модель и проведено моделирование электропривода переменного тока с вентиляторной нагрузкой в среде Matlab Simulink, произведены исследования переходных процессов.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, прямой пуск, вентиляторная нагрузка.

Abstract. In this paper, the power transformer was calculated, a model was proposed and an AC drive with a fan load was simulated in the Matlab Simulink environment, and transients were studied.

Keywords: asynchronous motor, direct start, fan-type load.

Увеличение количества и установленной мощности электроприёмников с нелинейным и несимметричным характером нагрузки на транспорте и в быту, а также развитие технологических установок в промышленности приводят к ухудшению качества электрической энергии в системах электроснабжения.

В результате снижается эффективность работы, как самих систем электроснабжения, так и потребителей, подключённых к ним. Как следствие – электрооборудование, рассчитанное на работу в электрической системе при определённом уровне характеристик электрической энергии, во многих случаях эксплуатируется в неэффективных режимах, что приводит к отрицательным последствиям.

Не симметрия токов и напряжений влечёт за собой увеличение потерь электрической энергии в сетях и элементах её распределения. Ущерб от снижения качества электрической энергии обусловлен ухудшением энергетических показателей, снижением надёжности функционирования, увеличением потерь активной мощности и потребления активной и реактивной мощностей.

На современном этапе развития энергетики достаточно остро стоит вопрос перехода к энергосберегающим технологиям. Это вызвано возрастающим электропотреблением и снижением качества электрической энергии в различных отраслях [1-2].

Моделирование сложных энергетических систем позволяет дать качественную и количественную оценку процессов, проходящих в них. Поэтому чтобы определить возможность реализации указанной схемы и эффективность ее работы, необходимо провести имитационное моделирование. Используя возможности Simulink и SimPowerSystem можно не только моделировать, но и анализировать работу различных устройств. Библиотека блоков Sim Power System охватывает достаточно широкий спектр энергетического, измерительного и вспомогательного оборудования [3]. В то же время, если в стандартной библиотеке нет блока, моделирующего необходимое оборудование или алгоритм, то пользователь имеет возможность создать свой собственный блок.

На рисунке 1 представлена схема моделирования асинхронного двигателя с вентиляторной нагрузкой.

Для реализации идеального источника синусоидального напряжения, используется блок Three-Phase Source с выходным напряжением равное 35 кВ.

Для реализации силового трансформатора использовался блок Three-Phase Transformer (Two Windings). Который моделирует двухобмоточный трехфазный трансформатор. Модель Threephase Transformer (Two Windings) построена на основе трех однофазных трансформаторов. В модели может учитываться нелинейность характеристики намагничивания материала сердечника.

Тарасенко А.А.

Применение стемминга для информационного поиска среди медицинского кластера документов 547

Рыбка А.Д., Пестунов А.И., Белов В.М.

Сессии в ASP.NET или как создать собственный сервис для работы с ними 551

СЕКЦИЯ 4. Современный автоматизированный электропривод и промышленная электроника

Стищенко К.П., Кипервассер М.В.

Причины и влияние искажений питающего напряжения на функционирование устройств микропроцессорной электрической централизации железнодорожного транспорта 555

Федоров В.В.

Управление электроприводом постоянного тока с применением регулятора на нечеткой логике 559

Клевцов С.А., Модзелевский Д.Е.

Исследование системы векторного управления асинхронного многодвигательного электропривода кантования угольного вагоноопрокидывателя «ВРС-93-110М» 564

Бедарев М.А., Коновалов О.В., Кипервассер М.В.

Проблемы применения силовых трансформаторов с группой соединения обмоток Y/Yn-0 в распределительных сетях 0,4 кв. 571

Мезенцева А.В.

Вопросы выбора и применения технических средств регулируемого электропривода буровых установок..... 575

Филина О.А., Прокопенко С.С.

Линейные модели систем в пространстве состояний 578

Островляничик В.Ю., Кубарев В.А., Зайцев Н.С., Кузнецова Е.С.

Имитационное моделирование системы автоуправления с переменной структурой для векторного управления синхронным электродвигателем классической конструкции 586

Островляничик В.Ю., Маршев Д.А., Кубарев В.А., Поползин И.Ю.

Синтез адаптивного управления магнитным потоком возбуждения статора асинхронного двигателя с фазным ротором..... 592

Сарсембин А.О., Кубарев В.А., Асмаатбеков А.К.

Моделирование электропривода переменного тока с вентиляторной нагрузкой 599

Бабушкин С.В., Кубарев В.А.

Внедрение системы предиктивной аналитики на агрегатах цеха химического улавливания и производства коксохимической продукции АО «ЕВРАЗ ЗСМК» 605

Колчагов П.О., Борщинский М.Ю.

Разработка регулятора мощности с помощью системы автоматизированного проектирования Proteus..... 608

Рогожников И.П.

Технология подготовки печатных плат к производству..... 612

Научное издание

**СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ
(в образовании, науке и производстве)
AS' 2022**

**ТРУДЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО–ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ**
(с международным участием)

15-16 декабря 2022 г.

Под общей редакцией д.т.н., доц. В.В. Зимина

Техническое редактирование и компьютерная верстка В.И. Кожемяченко

Подписано в печать 05.12.2022 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 37.13. Уч.-изд. л. 40.40. Тираж ____ экз. Заказ ____.

Сибирский государственный индустриальный университет
654007, Кемеровская область – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, зд. 42.
Издательский центр СибГИУ