

nezavisimogo возбuzhdeniya [Valve electric drive with separately excited reluctance motor]. *Elektrotekhnika* [Electrical engineering], 2013, no. 3, pp. 37–43.

14. Usynin Yu.S., Lohov S.P., Grigoryev M.A., et.al. Elektroprivody s sinhronnoi reaktivnoi mashinoy nezavisimogo возбuzhdeniya dlya stanov holodnoi prokatki trub [Electric drives with synchronous separately excited reluctance motor for cold rolling tube mills]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2012, issue 17, no. 16(275), pp. 107–110.

15. Usynina Yu.S., Grigoryeva M.A., Shishkova A.N., et.al. Sintez sistemy upravleniya elektroprivodom s sinhronnoi reaktivnoi mashinoy nezavisimogo возбuzhdeniya [Integration of electric drive control system and synchronous separately excited

reluctance motor]. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of SUSU. Series «Power engineering»], 2012, issue 18, no. 37(296), pp. 38–41.

16. RF Patent 2275723, МПК7 H 02 H 3/24, H 02 H 7/00. *Ustroistvo zaschity tiristornogo preobrazovatelya* [Thyristor converter protecting device]. L.I. Tsytoich, M.M. Dudkin, O.G. Tereschina. № 2005100929/09; applied 17.01.05; published 27.04.06, Bulletin no. 12.

17. Shkalikov S.I., Popov Yu.G., Tugaev V.A., et.al. Puti razvitiya energochoyzaivstva i energosberezhenii na OAO «Chelyabinskii truboprokatnyi zavod» [Ways of power utilities and energy saving development at OJSC «Chelyabinsk tube-rolling mill»]. // *Nauka i tehnologii: trodi XXVII Rossiiskoi shkoli* [Science and technology. works of the XXVII Russian school]. M.: Russian Academy of Sciences, 2008. Vol. 2. Pp. 153–162.

УДК 621.313

Линьков С.А., Сарваров А.С., Бачурин И.В.

### АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Проведен анализ систем управления современных синхронных электроприводов по каналу цепи статора и ротора. Рассмотрены преимущества и недостатки систем регулирования, обеспечивающих гашение угла нагрузки синхронной машины в динамических режимах работы.

**Ключевые слова:** система управления синхронным двигателем, угол нагрузки, положительная обратная связь, синхронный двигатель, статор, ротор.

#### ВВЕДЕНИЕ

За несколько десятилетий автоматизированный электропривод синхронных машин продвинулся далеко вперед. Системы управления синхронных машин и их конструкция претерпели значительные изменения и усложнения. Основными направлениями развития синхронных автоматизированных электроприводов являются совершенствование систем автоматического регулирования по каналу возбуждения и статора СД с целью обеспечения их устойчивой работы в статических и динамических режимах, частотное управление скоростью двигателей для различного типа механизмов.

Существующие на данный момент системы управления (СУ) синхронных двигателей (СД) делятся на:

- 1) СУ по каналу цепи обмотки возбуждения;
- 2) СУ по каналу цепи якоря (статора);
- 3) гибридные СУ СД (по каналу статора и ротора).

Система АРВ с улучшенными динамическими характеристиками должна:

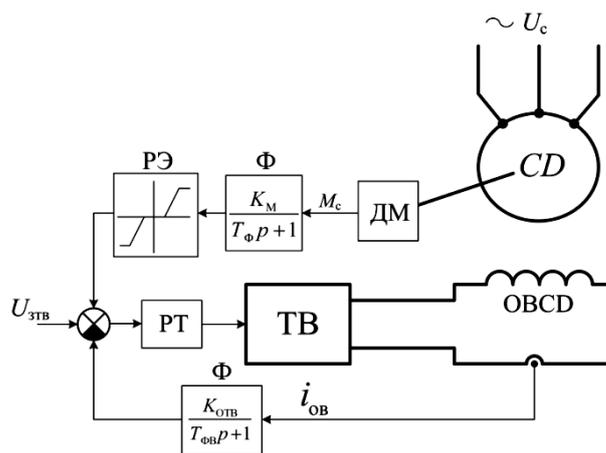
- обеспечивать устойчивую работу СД в переходных режимах при минимуме колебаний активной и реактивной мощности;
- демпфировать качания ротора и активного тока статора.

#### САРВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО СТАТИЧЕСКОМУ МОМЕНТУ НАГРУЗКИ

Данный способ автоматического регулирования прост с точки зрения реализации и не требует математической обработки и вычислений (**рис. 1**).

Сигнал статического момента напрямую с датчика поступает на внутренний контур регулирования тока возбуждения посредством положительной обратной

связи. В качестве датчика статического момента в таких системах используют тензометрические датчики, либо мездозы. У данного типа датчиков есть недостаток – низкое по амплитуде выходное напряжение. В результате этого недостатка в систему регулирования вместе с полезным сигналом подается и паразитный сигнал помехи, который надо фильтровать. Фильтр, в свою очередь, по каналу обратной связи вносит задержку по времени, из-за чего колебательность контура увеличивается.



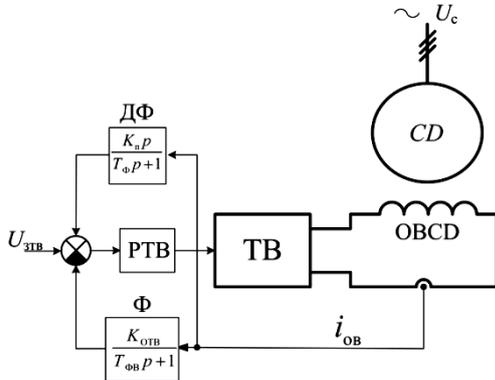
**Рис. 1. Функциональная схема системы регулирования тока возбуждения с положительной обратной связью по моменту нагрузки:**

РЭ – релейный элемент с зоной нечувствительности; Ф – фильтр; ДМ – датчик момента; РТ – регулятор тока; ТВ – тиристорный возбудитель

#### САРВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ПО ПРОИЗВОДНОЙ АКТИВНОГО ТОКА ПО ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Датчиком тока в цепи обмотки возбуждения, как правило, служит шунт. Сигнал, пропорциональный

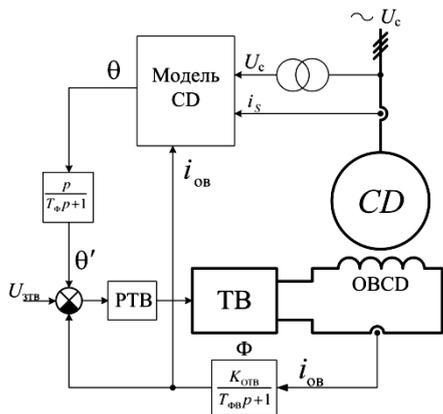
току возбуждения, – пульсирующий, т.к. возбудитель реализован на базе мостовой управляемой схемы выпрямления (рис. 2). Для выделения «чистого» сигнала активного тока возбуждения необходим инерционный фильтр по каналу обратной связи, который бы убрал пульсирующую составляющую. Инерционный фильтр вносит запаздывание и, как следствие, система становится колебательной с большими значениями перерегулирования по току и напряжению возбуждения.



**Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования тока возбуждения с датчиком производной активного тока:**  
 РТВ – регулятор тока возбуждения; ДФ – дифференциальный фильтр по каналу положительной обратной связи по току; Ф – фильтр по каналу отрицательной обратной связи по току

САРВ с положительной обратной связью по производной ВНУТРЕННЕГО УГЛА  $\theta'$

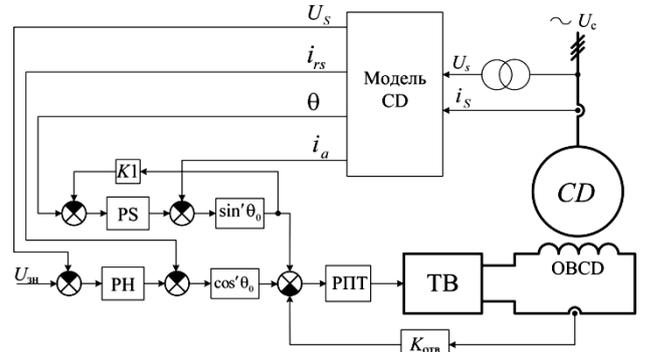
На рис. 3 приведена функциональная схема системы регулирования тока возбуждения СД в функции производной угла  $\theta$ , а на рис. 4 – с регулятором скольжения с ПД-структурой. В первой схеме производная угла нагрузки выделяется на входе регулятора тока, а во второй – в регуляторе скольжения.



**Рис. 3. Функциональная схема системы регулирования тока возбуждения СД в функции производной угла  $\theta$ :**  
 РТ – регулятор тока; ТВ – тиристорный возбудитель;  
 РТВ – регулятор тока возбуждения

По данным САРВ было проведено множество научных исследований и работ, которые выявили высокую эффективность гашения колебаний угла нагрузки  $\theta$  в динамических режимах [3]. В результате быстродействующей положительной обратной связи по  $\theta'$  увеличивается перегрузочная способность, а также уменьшается динамическая нагрузка на питающую

сеть. Математический расчет угла нагрузки – сложная, с точки зрения аппаратной реализации, задача. Существующие датчики угла  $\theta$  имеют погрешность измерения и инерционность из-за применения фильтров.



**Рис. 4. Функциональная схема АВР в функции внутреннего угла  $\theta$ :**

PS – регулятор скольжения с ПД-структурой; РПТ – регулятор продольного тока; РН – регулятор напряжения цепи возбуждения; ТВ – тиристорный возбудитель;  
 K1 – пропорциональный элемент

Представленная на рис. 5 функциональная схема САРВ с идентификатором угла нагрузки СД иллюстрирует трёхконтурную систему с уточненной математической моделью выделения угла нагрузки  $\theta$  [2]. Для косвенного измерения угла  $\theta$  используются сигналы датчика тока возбуждения ДТР, датчика напряжения возбуждения ДНР, датчика тока ДТС и напряжения ДНС статора. В результате вычислений было получено значение внутреннего угла нагрузки СД, которое использовано в качестве параметра обратной связи контура регулирования продольного тока.

Реализация такой структурной схемы трехконтурной системы АВР СД с дополнительным воздействием по углу нагрузки потребует мощной, быстродействующей и дорогой микропроцессорной базы, т.к. для вычисления угла нагрузки используется большая математическая модель.

В предлагаемой системе АВР реактивный ток статора поддерживается на заданном оптимальном уровне, а колебательность ротора и время переходного процесса снижены при этом в 2–4 раза.

Постоянное совершенствование современных микропроцессорных средств сделало возможной программную реализацию весьма сложных законов управления электроприводов с синхронными двигателями на постоянных магнитах (СДПМ) [5], а также с реактивными синхронными гибридными двигателями (РСГД) [6]. У РСГД статор выполнен, как у серийного асинхронного двигателя, а ротор состоит из двух частей. Основная часть выполнена в виде явнополюсного ротора без обмотки возбуждения, как у синхронного реактивного двигателя, а вторая часть имеет постоянные магниты, встроенные в межполюсные промежутки ротора. Такое конструктивное исполнение СГД позволяет объединить в себе положительные свойства синхронных реактивных и магнитоэлектрических машин с постоянными магнитами.

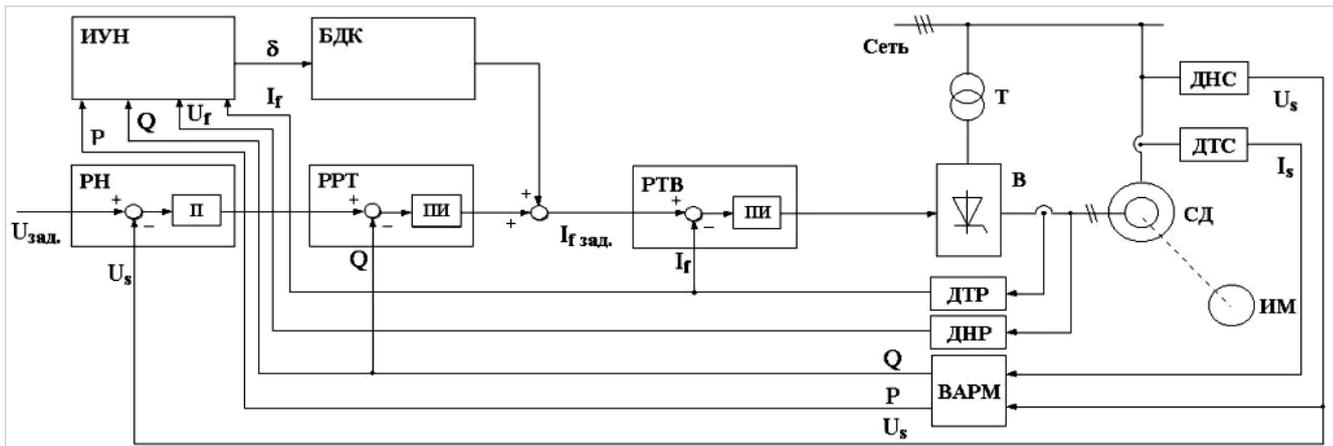


Рис. 5. Функциональная схема САРВ с идентификатором угла нагрузки СД:

ИМ – исполнительный механизм, В – тиристорный выпрямитель, Т – трансформатор, ДНС – датчик напряжения статора, ДТС – датчик тока статора, ДТР – датчик тока ротора, ВАРМ – вычислитель активной и реактивной мощностей СД, РТВ – регулятор тока возбуждения, РРТ – регулятор реактивного тока, РН – регулятор напряжения, БДК – блок демпфирования колебаний ротора, ИУН – идентификатор угла нагрузки СД

Системы регулирования скорости для СД без обмотки возбуждения требуют координаты угла поворота ротора относительно магнитного поля статора (рис. 6). Таким образом, для качественного регулирования скорости СД, особенно с нагрузкой, необходима установка датчика положения (ДП), либо косвенное вычисление угла поворота ротора. Монтаж ДП к валу СД не всегда возможен (например, в насосах закрытого типа), либо он существенно увеличит стоимость привода.

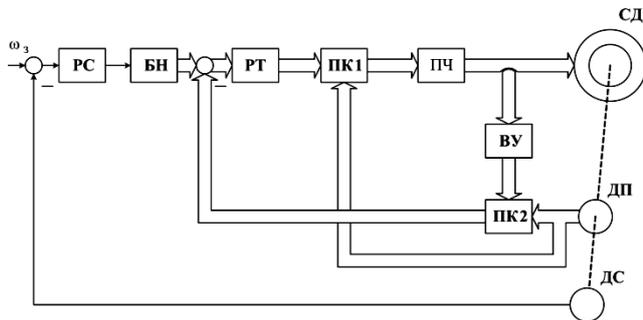


Рис. 6. Обобщенная функциональная схема многоканальной САУ  $m$ -фазным СД:

РС, РТ – регуляторы скорости, составляющих векторов тока статора и тока возбуждения соответственно; БН – блок нелинейностей; ПК1, ПК2 – преобразователи координат; ПЧ – преобразователь частоты; ВУ – вычислительное устройство; ДП, ДС – датчики положения и скорости соответственно

Косвенный ДП – это внутренняя математическая модель, которая должна быстро и без ошибок обрабатываться микроконтроллером, потому что в мощных и ответственных электроприводах ошибка координат положения ротора чревата потерей электромагнитного момента на валу и, как следствие, аварией на объекте регулирования.

Что касается демпфирования угла нагрузки в таких системах, то косвенное определение угла  $\theta$  в таких САУ усложняется и напрямую привязана к математической модели косвенного определения положения ротора. Гашение колебаний угла  $\theta$  возможно увеличением амплитуды напряжения (тока) посредством ПЧ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ перечисленных систем управления СД выявил некоторые их недостатки:

1. Качественное и быстрое демпфирование колебаний угла нагрузки  $\theta$  только лишь по каналу цепи возбуждения предполагает существенную форсировку напряжения возбуждения, но не у всех серийных СД изоляция ОВ может выдержать такое повышение напряжения. Чтобы сберечь двигатель, придется ограничивать форсировку ОВ, вследствие чего эффективность гашения колебаний угла нагрузки снижается.

2. Реализация автоматизированного электропривода СД с косвенными датчиками положения угла ротора и угла нагрузки  $\theta$  предполагает наличие мощного, быстродействующего и дорогого микропроцессорного модуля, который бы без ошибок обрабатывал математические модели датчиков.

Указанные недостатки говорят о том, что многие принципиальные моменты в СУ СД до конца не исследованы. Тем самым, остаются открытыми такие значимые вопросы СУ СД, как: эффективное и быстродействующее гашение колебаний угла нагрузки СД с резкопеременной нагрузкой, особенно для высокоскоростных электроприводов; разработка и реализация высокоточных и надёжных немеханических датчиков положения ротора и угла нагрузки  $\theta$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапин А.А. Разработка многофазного синхронного регулируемого электропривода для мобильных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ», 2007. 16 с.
2. Степанов С.Е. Система возбуждения синхронных двигателей турбокомпрессоров с идентификатором угла нагрузки: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород: НГТУ, 2012. 18 с.
3. Исследование режимов работы синхронного двигателя с автоматическим регулированием возбуждения в функции внутреннего угла / Д.В. Фомин, В.И. Косматов, Ю.В. Мерзляков, Г.Г. Толмачев // Электротехнические системы и комплексы: межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2004. Вып. 9. С. 168-174.
4. Адаптация преобразователя Simoreg для возбуждения мощных синхронных двигателей / Г.П. Корнилов, Р.Р. Храпшин, А.А. Мурзиков, Д.Ф. Хамитов // Электротехниче-

ские системы и комплексы: межвуз. сб. науч. трудов. Магнитогорск: МГТУ, 2007. Вып. 14. С. 108-113.

5. Хромов И.С. Исследование и разработка регулирующего устройства высокооборотного вентильного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов: автореф. дис. ...

канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2011. 20 с.

6. Суворкова Е.Е., Дементьев Ю.Н., Бурулько Л.К. Характеристики гибридной синхронной машины // Известия Томского политехнического университета. Томск: ТПУ, 2013. С. 170-172.

## INFORMATION IN ENGLISH

### ANALYSIS OF SYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE CONTROL SYSTEMS

Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.V.

The analysis of modern control systems via synchronous electric circuit of the stator and rotor was carried out. The advantages and disadvantages of control systems providing damping of load angle for a synchronous machine in dynamic operation modes were considered.

**Keywords:** synchronous motor control system, load angle, positive feedback, synchronous motor, stator, rotor.

#### REFERENCES

1. Lapin A.A. *Razrabotka mnogofaznogo sinhronnogo reguliruemogo elektroprivoda dlya mobilnykh ustanovok* [Development of a multiphase synchronous controlled drive for mobile applications]. Abstract of Ph.D. thesis. Ivanovo GOU VPO «IGEU», 2007. 16 p.

2. Stepanov S.E. *Sistema возбуждения синхронных двигателей турбокомпрессоров с идентификатором угла нагрузки* [Excitation system of synchronous motors with turbochargers identifier load angle]ю Abstract of Ph.D. thesis. N. Novgorod State Technical University, 2012. 18 p.

3. Fomin D.V., Kosmatov V.I., Merzljakov Y.A., Tolmachev G.G. *Issledovanie rezhimov raboty sinhronnogo dvigatelya s avtomaticheskim regulirovaniem возбуждения v funktsii vnutrennego ugla* [Study of synchronous motor modes

with automatic control of the excitation function in the inner corner] // *Elektrotehnicheskie sistemi i kompleksi* [Electrical systems and complexes]. Collection of scientific papers. Magnitogorsk: NMSTU, 2004, issue 9, pp. 168-174.

4. Kornilov G.P., Khramshin R.R., Murzikov A.A., Hamitov D.F. *Adaptatsiya preobrazovatelya Simoreg dlya возбуждения moschnykh sinhronnykh dvigatelei* [Adaptation of Simoreg converter for powerful synchronous motors driving] // *Elektrotehnicheskie sistemi i kompleksi* [Electrical systems and complexes]. Collection of scientific papers. Magnitogorsk: NMSTU, 2007, issue 14, pp. 108-113.

5. Hromov I.S. *Issledovanie i razrabotka reguliruyushego ustroystva vysokooborotnogo ventilynogo dvigatelya s возбуждением от постоянных магнитов* [Research and development of a control device for a high-speed valve engine with permanent magnets]. Abstract of Ph.D. thesis. Moscow: MPEI, 2011. 20 p.

6. Suворкова Е.Е., Деметьев Ю.Н., Бурулько Л.К. *Характеристики гибридной синхронной машины* [Features of hybrid synchronous machine]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tomsk Polytechnical University]. Tomsk Polytechnical University, 2013, pp. 170-172.

УДК 621.31

Греков Э.Л., Филимонов С.И.

### ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В КАРЬЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРАХ

Рассмотрены процессы, происходящие в системе тиристорный преобразователь–двигатель при отключении электрической сети. Показано, что наличие фильтрокомпенсирующих устройств приводит к прерыванию тока якоря в инверторном режиме работы. Продление генерирования импульсов управления тиристорами после отключения сети способствует увеличению напряжения на конденсаторах и улучшению условий принудительной коммутации.

**Ключевые слова:** электропривод, карьерный экскаватор, система тиристорный преобразователь-двигатель.

#### ВВЕДЕНИЕ

Опрокидывание тиристорного инвертора, ведомого сетью, является одной из тяжелых аварий. Это происходит вследствие пропадания импульса управления тиристором или при внезапном пропадании питающей сети. Если первый случай связан с надежностью работы системы управления, то отключение питающей сети может происходить и в процессе нормальной работы преобразователя. Особенно это актуально для электрооборудования карьерных экскаваторов с электроприводами основных механизмов, выполненных по системе «тиристорный преобразователь-двигатель» (ТП-Д).

Для обеспечения электромагнитной совмести-

сти таких систем электропривода наличие фильтрокомпенсирующего устройства обязательно [1]. Однолинейная силовая схема главных приводов карьерного экскаватора ЭКГ-12К показана на **рис. 1**.

Электрооборудование данного экскаватора разработано и изготовлено фирмой ОАО «Рудоавтоматика». Питание экскаватора осуществляется от двух трансформаторов TV3 и TV4 с установленной мощностью 400 кВА (см. **рис. 1**), каждый по схемам «звезда-звезда» и «треугольник-звезда». К вторичным обмоткам подключается ТП главных приводов подъема, поворота и поворота. Каждый преобразователь работает по шестипульсной схеме, причем два двигателя наиболее мощного привода подъема питаются независимо от