

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-83::621.313.3

## ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ ТЯГОДУТЬЕВЫХ МЕХАНИЗМОВ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ\*

Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков,  
Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов  
г. Челябинск, ЮУрГУ

## POWER SAVINGS IN THE ELECTRIC DRIVES OF FORCED-DRAFT MECHANISMS OF MULTICONNECTED OBJECTS

Yu.S. Usinin, M.A. Grigoryev, A.N. Shishkov, A.E. Bychkov,  
D.I. Kashaev, T.T. Moskov  
Chelyabinsk, South Ural State University

Сопоставляются величины потребления электроэнергии электроприводами тягодутьевых механизмов при различных способах регулирования. Обращается внимание на возможность энергосбережения за счет использования простых решений на базе электропривода с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения.

**Ключевые слова:** энергосбережение, многосвязные объекты, синхронная реактивная машина независимого возбуждения.

Electric power consumption by the electric drives of the forced-draft mechanisms in various control modes is compared in the article. The authors draw their attention to possibility of power supply with the use of simple solutions on the basis of electric drive with synchronous reluctance separately excited machine.

**Keywords:** energy saving, multiconnected objects, synchronous reluctance separately excited machine.

**Введение.** Предприятия чёрной и цветной металлургии потребляют около 10 % вырабатываемой в стране электроэнергии и являются одной из энергоёмких отраслей промышленности. С переходом на рыночные отношения и ростом цен на энергоносители составляющая затрат в себестоимости товарной продукции выросла в чёрной металлургии с 15 в 1990 г. до 35 % в 1999 г., а суммарные затраты на энергоносители и транспортные услуги – соответственно с 21,3 до 52,2 % [4]. Наблюдается опережающий рост стоимости энергоресурсов по сравнению с ростом цен на металлопрокат.

**Постановка задачи.** Чтобы полноценно решить задачу оптимизации режима потребления электроэнергии электроприводом ряда агрегатов, взаимодействующих в едином технологическом процессе, необходимо знать их рабочие характеристики, энергетические характеристики электроприводов и параметры технологических связей

между отдельными агрегатами. Как правило, в аналитическом виде все эти зависимости представить не удастся, поэтому приходится пользоваться графическими характеристиками. А так как графические зависимости даются для конкретных технологических агрегатов, то задачу разработки математических моделей энергосберегающих электроприводов многосвязных технологических объектов нагляднее и проще решать на примере конкретного технологического объекта. В качестве такого примера рассмотрим задачу оптимизации режимов электроприводов тягодутьевых агрегатов (ТДА) водогрейных и паровых котлов, которую авторы выполняли для горнорудного предприятия ОАО «Комбинат «Магnezит». Здесь в едином газозоудном тракте котла наблюдается совместная работа электроприводов вентилятора, подающего воздух, и дымоcоса с вытяжной трубой, которые обеспечивают необходимую степень разрежения в газозоудном пространстве котла.

\* Работа проводится в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по проблеме «Энергосберегающие решения в металлургической и горнорудной промышленности с традиционными и новыми типами электроприводов», конкурс НК 439П.

В существующей многочисленной литературе, посвященной энергетике и рационализации режимов тягодутьевых аппаратов, рассматривается, как правило, автономная работа электропривода совместно с этим аппаратом [3]. Между тем, поскольку эти агрегаты в действующем котле связаны единым газовоздушным каналом, то нельзя не учитывать их совместное взаимное влияние друг на друга как с точки зрения безопасного ведения технологического процесса, так и решения задачи оптимизации электропотребления. Разработка модели ставится в рамках достижения возможного минимума потребления электрической энергии электроприводами вентиляторов и дымососов при условии обязательного выполнения заданного технологического режима котла (поддержания заданной теплопроизводительности).

**Математическая модель электропривода ТДА многосвязных объектов.** Суть поставленной задачи наиболее наглядно можно проиллюстрировать эпюрой (рис. 1), где по горизонтальной оси отложена величина аэродинамического сопротивления  $R$  газовоздушного тракта котла, а по вертикальной оси – перепады давлений вдоль газовоздушного тракта, а также создаваемые вентилятором и дымососом. Вдоль этого тракта установлен вентилятор (штриховая вертикаль В–В на рис. 1), создающий избыточное давление на входе тракта, дымосос (штриховая вертикаль Д–Д на рис. 1), создающий отрицательный перепад давления. Кроме того, для измерения степени разрежения в топочном пространстве установлен тягонапор-

мер (ему соответствует вертикаль Т–Т на рис. 1).

В качестве исходного варианта рассмотрим случай, когда газовоздушный тракт котла полностью уравновешен (например, при холодном неработающем котле), а включен только электропривод вентилятора. Этому случаю соответствует ломаная 0–1–2–3–4–5: сначала вентилятором создается скачок избыточного давления (отрезок 1–2), которое равномерно падает к выходу до нуля (прямая 2–3–4). Наклон этой прямой для существующего газовоздушного тракта тем больше, чем больше расход. Величина начального скачка давления 1–2 создается и регулируется вентилятором, а наклон прямой 2–3–4 определяется расходом.

В соответствии с техническими требованиями к работе котла в точке Т установлен тягонапормер и в этой точке необходимо создать разрежение  $\Delta H_T = -(28...32)$  Па.

Наклон прямой 2–3–4 для существующего газовоздушного тракта и заданного расхода изменить нельзя, поэтому, чтобы получить в точке Т требуемую величину разрежения, необходимо прямую 2–3–4 сместить параллельно самой себе до получения требуемого перепада  $\Delta H_T$  (ломаная 0–1–6–7–8–4–5). Для этого придется, во-первых, снизить любым из известных способов перепад давления, создаваемый вентилятором, а во-вторых, создать отрицательный перепад (дополнительное разрежение) в точке Д, где установлен дымосос.

При этом если расход воздуха не меняется, то разница высот между точками 2 и 4, а также 6 и 8 остается неизменной.

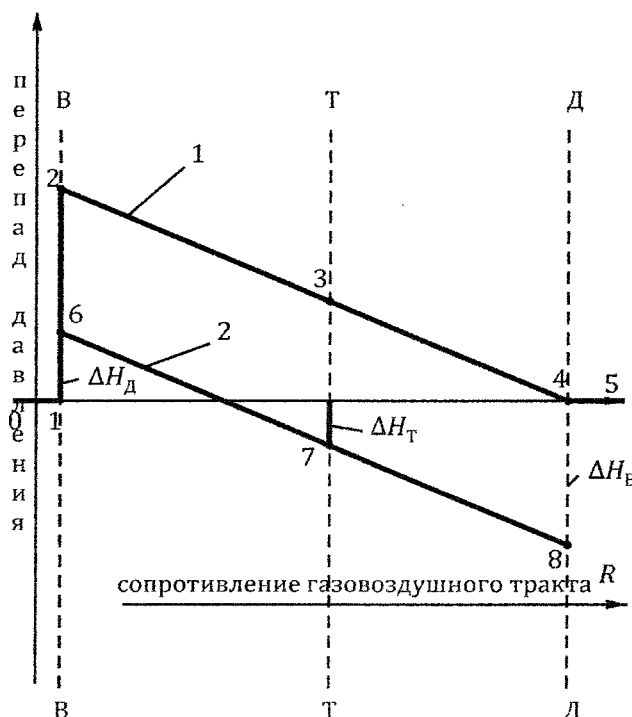


Рис. 1. Эпюры распределения давления  
газовоздушного тракта котла

Величина напора со стороны вентилятора и разрежение со стороны дымососа не могут быть выбраны произвольно, а должны быть такими, чтобы сохранить неизменной высоту (глубину) точки 7 над (под) горизонтальной осью.

Положение точки Т вдоль горизонтальной оси зависит, во-первых, от места установки тягонапоромера и, во-вторых, от конструкции газовоздушного тракта и места установки вспомогательного оборудования (например, дополнительных теплообменников и др.).

Итак, от положения точки Т на оси R зависит смещение по вертикали прямой 2–3–4 (или 6–7–8), т.е. степень взаимного влияния вентилятора и дымососа. Но на практике точное положение точки Т на оси R определить сложно.

В связи с этим обратим внимание на следующее обстоятельство, подмеченное при проведении экспериментальных исследований. На котлах типа ДЕ величина аэродинамического сопротивления газовоздушного тракта много меньше сопротивления регулирующих аппаратов (шиберов, направляющих аппаратов). Поэтому можно высказать предположение, что энергетические показатели электроприводов ТДА, рассчитанные при автономной работе агрегатов для определенной фиксированной величины расхода, останутся такими же и при совместной работе.

Чтобы убедиться в этом, были сопоставлены расчеты по аэродинамическим характеристикам вентилятора ВДН-9 и дымососа ДН-11,5 и экспериментальные результаты измерений потребления электроэнергии электроприводами этих агрегатов в одном из реальных режимов работы котла ДЕ-16-14, когда расход газа  $Q_{\Gamma} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Выполненный расчет приведен ниже.

Общий расход воздуха

$$Q = K_{\text{прив}} K_{\text{изб}} Q_{\Gamma} = 10,5 \cdot 1,281 \cdot 500 = 6700 \text{ м}^3/\text{ч} = 1,9 \text{ м}^3/\text{с}.$$

По аэродинамической характеристике вентилятора ВДН-9 определялась аэродинамическая мощность вентилятора

$$P_{\text{вент}} = H Q = 3400 \cdot 1,9 = 6,5 \text{ кВт},$$

при  $Q = 1,9 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $H = 3400 \text{ Па}$ .

Мощность электрическая активная, потребляемая электроприводом вентилятора из сети, измеренная в ходе эксперимента,

$$P_{\text{акт}} = 10,2 \text{ кВт}.$$

Принимая КПД двигателя  $\eta_{\text{эд}} = 0,9$ , была получена величина мощности на валу вентилятора

$$P_{\text{вала}} = P_{\text{акт}} \eta_{\text{эд}} = 10,2 \cdot 0,9 = 9,2 \text{ кВт}.$$

В итоге КПД вентилятора

$$\eta_{\text{вент}} = P_{\text{вент}} / P_{\text{вала}} = 6,5 / 9,2 = 0,71.$$

На аэродинамической характеристике вентилятора ВДН-9 [7] для той же пары значений расхода воздуха и давления получили  $\eta \approx 0,7$ , что прак-

тически совпадает с результатами расчета на основании экспериментальных исходных данных.

Аналогичный расчет проводился для дымососа ДН-11,2.

По аэродинамической характеристике дымососа [6] при  $Q = 1,9 \text{ м}^3/\text{с}$  нашли  $H = 3300 \text{ Па}$ .

Аэродинамическая мощность дымососа

$$P_{\text{дым}} = H Q = 3300 \cdot 1,9 = 6,3 \text{ кВт}.$$

Активная электрическая мощность, измеренная в ходе эксперимента, потребляемая электроприводом дымососа из сети

$$P_{\text{акт}} = 19,1 \text{ кВт}.$$

Принимая КПД двигателя  $\eta_{\text{эд}} = 0,8$  (что несколько ниже номинального значения из-за недогрузки), получили величину мощности на валу дымососа

$$P_{\text{вала}} = P_{\text{акт}} \eta_{\text{эд}} = 19,1 \cdot 0,8 = 15,3 \text{ кВт}.$$

В итоге КПД дымососа

$$\eta_{\text{дым}} = P_{\text{вент}} / P_{\text{вала}} = 6,3 / 15,3 = 0,4.$$

На аэродинамической характеристике дымососа ДН-11,2 [6] для той же пары значений расхода и давления имеем  $\eta \approx 0,5$ . Расхождения в величинах КПД дымососа, полученных разными путями, имеются, но величина их вполне приемлема для оценочных расчетов.

Итак, приведенный расчет дает основание выполнять энергетические расчеты в электроприводах ТДА при совместной работе вентилятора и дымососа так же, как и при их раздельной работе. Это позволяет, во-первых, упростить сами расчеты, а во-вторых, пользоваться методиками, изложенными ниже.

**Расчет потребления электроэнергии электроприводами ТДА.** Используя методы расчета при разных способах регулирования расхода воздуха в газовоздушном тракте котлов [2, 3], результаты экспериментальных измерений, паспортные данные и характеристики агрегатов, можно перейти непосредственно к выбору наиболее выгодного варианта регулируемого электропривода ТДА и спрогнозировать при этом величину возможной экономии электроэнергии.

Предлагается следующая последовательность расчетов. Для заданной производительности котла на основании режимной карты определяют требуемый расход газа  $Q_{\Gamma}$  и по нему – расход воздуха  $Q_{\text{возд}}$ . Пользуясь аэродинамической характеристикой ТДА, переходят к определению величины давления  $H$  и КПД агрегата  $\eta_{\text{ТДА}}$ . При дроссельном регулировании расхода следует пользоваться основной характеристикой, когда угол направляющего аппарата  $\theta_{\text{НА}} = 0$ , при регулировании расхода направляющим аппаратом – частными, когда этот угол отличен от нуля. При малых расходах энергетической разницы между этими способами практически нет. При максимальной

Потребление электроэнергии электроприводами ТДА котла ДЕ-16-14  
в зависимости от расхода воздуха при разных способах регулирования

| Тип ТДА    | Наименование              | Величина |      |      |
|------------|---------------------------|----------|------|------|
|            |                           | 1,52     | 3    | 4    |
| Вентилятор | Расход, м <sup>3</sup> /с | 1,52     | 3    | 4    |
|            | РэлДР, кВт                | 8        | 13   | 13,5 |
|            | РэлНА, кВт                | 6,5      | 11,3 | 13,5 |
|            | Рэлрс, кВт                | 0,2      | 1    | 2    |
|            | РэлДР, кВт                | 10       | 15,5 | 19,2 |
| Дымосос    | РэлНА, кВт                | 10       | 13,1 | 17,3 |
|            | Рэлрс, кВт                | 0,2      | 1    | 5    |
|            | РэлДР, кВт                | 18       | 28,5 | 32,7 |
| Все ТДА    | РэлНА, кВт                | 16,5     | 24,4 | 30,8 |
|            | Рэлрс, кВт                | 0,4      | 2    | 4    |

Примечание. РэлДР, РэлНА, Рэлрс, – мощность, потребляемая электроприводом ТДА из сети при дроссельном регулировании, регулировании направляющими аппаратами и регулировании изменением угловой скорости вала ТДА.

производительности котла, когда расход  $Q \approx Q_{\text{МАКС}}$ , эта разница, как показали расчеты для электроприводов ТДА, может достигать до (10–15)% в пользу регулирования расхода направляющими аппаратами.

В случае регулирования расхода изменением угловой скорости вала ТДА (например, при частотном регулировании) за исходную точку следует брать аэродинамическое состояние ТДА в точке при максимальной скорости агрегата и полностью открытых регулирующих устройствах. Так как при фиксированном положении лопаток направляющего аппарата расход пропорционален угловой скорости вала ТДА, то для получения расхода воздуха, равного  $Q$ , угловую скорость агрегата необходимо снизить до значения:

$$n = n_0 Q / Q_{\text{ПРЕД}}.$$

Здесь  $n_0$  – угловая скорость вала агрегата, для которой дана его основная аэродинамическая характеристика (обычно – номинальная скорость приводного асинхронного двигателя при работе его от промышленной сети 50 Гц);  $Q$  – текущее значение расхода. Обычно  $Q_{\text{МИН}} \leq Q \leq Q_{\text{МАКС}}$ ;  $Q_{\text{МИН}}$  и  $Q_{\text{МАКС}}$  – величины расхода при минимальной и максимальной тепловой производительности котла;  $Q_{\text{ПРЕД}}$  – предельно возможное для данного агрегата значение расхода, создаваемого ТДА при максимальной (обычно номинальной) угловой скорости агрегата и полностью открытых регулирующих устройствах (шиберах, направляющих аппаратах), установленных по ходу газозвоздушного тракта.

Величина перепада давления, создаваемого ТДА, пропорциональна квадрату его угловой скорости, поэтому

$$H = H_G (n/n_0)^2.$$

Здесь  $H_G$  – перепад давлений, создаваемый ТДА при максимальной скорости агрегата  $n_0$  и полностью открытых регулирующих устройствах.

Механическая мощность на валу ТДА определяется на основании выражения

$$P_{\text{ВАЛА}} = H Q / \eta_{\text{ТДА}}.$$

Наконец, электрическая мощность, потребляемая электроприводом из сети,

$$P_{\text{СЕТИ}} = P_{\text{АКТ}} = P_{\text{ВАЛА}} / \eta_{\text{ЭД}}.$$

Для значений расхода воздуха, заключенных в диапазоне  $Q_{\text{МИН}} = 1,52 \text{ м}^3/\text{с} \leq Q \leq Q_{\text{МАКС}} = 4,0 \text{ м}^3/\text{с}$ , рассчитаны величины электрической мощности, потребляемой из сети электроприводами вентилятора и дымососа для следующих способов регулирования расхода: с помощью дросселя, направляющего аппарата или изменением угловой скорости вала ТДА.

Результаты расчета приведены в таблице.

Общее годовое потребление электроэнергии всеми электроприводами ТДА:

$$W_{\text{ГОД}} = \sum P_{\text{ЭЛ}} \Delta t_J.$$

Здесь  $P_{\text{ЭЛ}}$  – потребление электроэнергии электроприводами ТДА (вентилятором и дымососом), когда расход равен  $Q$ ;  $\Delta t_J$  – продолжительность работы ТДА с величиной расхода  $Q$ . При этом  $\sum \Delta t_J = t_{\text{ГОД}}$  – общая продолжительность работы котла в году.

Если принять в качестве расчетного график месячного производства пара, то при дроссельном способе регулирования расхода воздуха годовое потребление электроэнергии электроприводами ТДА котла (вентиляторами и дымососами) составит:

$$W_{\text{ДРОСС}} \approx 120000 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

при регулировании расхода направляющими аппаратами

$$W_{\text{НА}} \approx 105000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

и, наконец, при регулировании расхода изменением угловой скорости вала ТДА (частотное регулирование)

$$W_{PC} \approx 10000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

**Обсуждение результатов.** Столь значительная (около 110000 кВт·ч/год) величина разницы в потреблении электроэнергии при переходе на частотное регулирование скорости вращения вала ТДА котла ДЕ-16-14 следует объяснить большим запасом по напору, который имеют установленные на котлах вентиляторы и дымососы.

Сопоставляя величины потребления электроэнергии электроприводами ТДА при различных способах регулирования расхода воздуха, получаем следующие расчетные значения годовой экономии электроэнергии:

– в электроприводах ТДА котла ДЕ-16-14 при переходе от дроссельного регулирования расхода воздуха к частотному

$$\Delta W_{ДЕ} \approx 110000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год};$$

– электроприводах ТДА котлов ПТВМ-30М:

$$\Delta W_{ПТВМ} \approx 70000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год};$$

– электроприводах ТДА котла КВГМ:

$$\Delta W_{КВГМ} \approx 86000 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}.$$

Если принять предполагаемую удельную цену на существующие преобразователи частоты в диапазоне мощностей от 50 до 100 кВт в среднем около 30 евро за 1 А, то установка преобразователей частоты на электроприводах тягодутьевых механизмов окупится примерно за 2,5...3 года.

Однако применение вентильных преобразователей на базе *IJBT* модулей не всегда оправдано из-за высокой стоимости, сложной эксплуатации, высокого уровня квалификации персонала, так как в них заложены избыточные регулировочные возможности.

Имеются также простые способы регулирования скорости, например, импульсно-векторное регулирование синхронной реактивной машины независимого регулирования. Данный способ обладает малыми капитальными затратами, простой эксплуатацией.

В предлагаемой варианте регулируемого электропривода, шестифазные обмотки (2, 3, 4, 5, 6, 7) синхронной реактивной машины с независимым возбуждением (СРМНВ) [1, 5, 8] подключаются на вход вентильного (тиристорного) преобразователя 9 (рис. 2). Между анодной и катодной группой включается датчик тока 16. Схема работает в режиме поддержания постоянного тока. Управление вентильным коммутатором 9 осуществляется в функции положения ротора 8 по сигналам датчика положения 18.

Применение относительно простой схемы силовых цепей на тиристорных вентилях позволит сэкономить на стоимости вентильного преобразователя. В указанном диапазоне мощностей (от 50 до 100 кВт) по данным дилеров стоимость тиристорного преобразователя будет примерно в 3 раза ниже, чем транзисторного преобразователя частоты. При этом сохраняются все привлекательные качества частотного регулирования скорости.

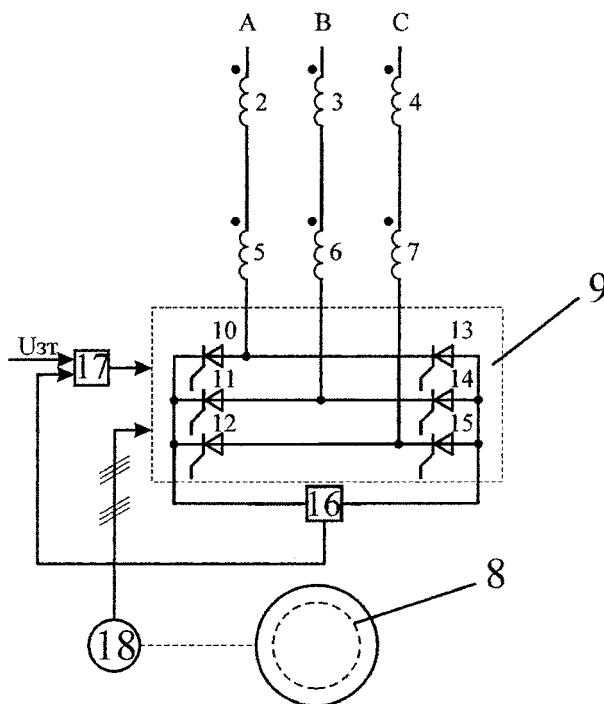


Рис. 2. Схема импульсно-векторного управления СРМНВ: 2, 3, 4, 5, 6, 7 – статорные обмотки шестифазного СРМНВ, 8 – пассивный (безобмоточный ротор) СРМНВ с явнополюсными полюсами, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 – тиристорные ключи мостового вентильного преобразователя, 16 – датчик тока, 17 – регулятор тока, 18 – датчик положения

**Литература**

1. Григорьев, М.А. Предельные возможности электроприводов с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 51–55.
2. Крылов, Ю.А. Проблемы применения энергосберегающего электропривода на дымососах котлоагрегатов / Ю.А. Крылов, С.С. Сапожников // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – Ч. 4. – С. 52–58.
3. Лезнов, Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 359 с.
4. Никифоров, Г.В. Комплексное управление электропотреблением и энергосбережением металлургического производства: спец. 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы: дис. ... д-ра техн. наук / Г.В. Никифоров. – Магнитогорск, 2001. – 357 с.
5. Пат. 2408972 Российская Федерация, МПК Н 02 Р 27/04, Н 02 Р 25/08, Н 02 Р 19/10. Электропривод с синхронной реактивной машиной и способ управления им / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов и др. – № 2009148381/07(071468); заявл. 24.12.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.
6. Тягодутьевые машины. В 2 ч. Ч. 1. Дымососы: отраслевой каталог. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1988. – 183 с.
7. Тягодутьевые машины. В 2 ч. Ч. 2. Вентиляторы дутьевые котельные: отраслевой каталог. – М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1988. – 119 с.
8. Усынин, Ю.С. Электроприводы и генераторы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов // Электричество. – № 3. – 2007. – С. 21–26.

**Поступила в редакцию 25.12.2010 г.**

**Усынин Юрий Семёнович.** Д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-21.

**Usynin Yury.** Doctor of Science (Engineering), professor of the Electric Drives and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Tel: 8 (351) 267-93-21.

**Григорьев Максим Анатольевич.** Канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Grigoryev Maxim.** Candidate of Science (Engineering), an associate professor of the Electric Drives and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk.

**Шишков Александр Николаевич.** Канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Shishkov Alexander.** Candidate of Science (Engineering), an associate professor of the Electric Drives and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk.

**Бычков Антон Евгеньевич.** Аспирант кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Bychkov Anton.** A post-graduate student of the Electric Drives and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk.

**Кашаев Денис Ильдусович.** Аспирант кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Kashaev Denis.** A post-graduate student of the Electric Drives and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk.

**Москов Тимур Талгатович.** Студент кафедры электропривода, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Moskov Timur.** A student of the Electric Drives and Automation of Industrial-Scale Plant Department of South Ural State University, Chelyabinsk.