



УДК 621.313

© А. С. Мешков, В. И. Суздорф, Н. А. Сюй, 2013

## ЭЛЕКТРОПРИВОД МАЛОЙ МОЩНОСТИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*Мешков А. С.* – асп. кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», e-mail: meshkov@live.ru; *Суздорф В. И.* – канд. техн. наук, проф. кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», e-mail: kera-pu@knastu.ru (КнАГТУ); *Сюй Н. А.* – асп. кафедры «Физика», e-mail: nicolaisyuy@gmail.com (ДВГУПС)

Предложен способ стабилизации частоты вращения однофазного коллекторного двигателя, основанный на использовании положительной обратной связи по темпу спада ЭДС самоиндукции двигателя. Произведено исследование данного способа на математической модели и предложена схемная реализация устройства, реализующего разработанный способ стабилизации скорости. Представлен оптимальный закон управления двигателем с точки зрения минимизации энергетических потерь в нем. Произведено исследование энергетических характеристик разработанной системы управления.

A method for stabilizing the rotational frequency of a single-phase commutator motor based on the positive feedback to the decrease rate of EMF self-induction is proposed. The proposed method has been tested on a mathematical model and schematic realization of the apparatus with which the proposed method can be implemented is given. The optimum control technique for the motor in terms of minimizing the energy loss is provided. Energy characteristics of the developed control system are studied as well.

*Ключевые слова:* однофазный коллекторный двигатель, постоянная времени ОКД, стабилизация частоты вращения, статические и динамические характеристики, оптимальное управление, энергоэффективность, широтно-импульсная модуляция, суммарный коэффициент гармоник, КПД, энергетические потери.

### Введение

Энергосбережение является одним из приоритетных направлений технической политики во всех развитых странах мира и сводится, как правило, к повышению энергоэффективности и снижению энергоемкости произ-

водства. Анализ структуры потерь в сфере производства, распределения и потребления электроэнергии показывает, что основная составляющая потерь (до 90%) приходится на сферу потребления электрической энергии [1]. Одним из основных потребителей электрической энергии во всем мире является электропривод. При этом следует отметить, что в промышленном секторе в каждом конкретном случае необходимы конкретные решения по оптимизации существующих производств, разработке новых технологий с целью повышения энергосбережения. Сегодня особое внимание в этом вопросе уделяется мощным электроприводам, однако, если учесть, что, например, мощные электродвигатели имеют и без того КПД порядка 95-99%, то процентный эффект здесь трудно получить значительным. С другой стороны, массовый электропривод малой и микро мощности при, казалось бы, незначительном повышении его энергоэффективности (на единицы ватт) даст мегаваттные результаты экономии электроэнергии за счет своей многомиллионности, ведь многие предприятия как в Хабаровском крае, так и во всем мире массово используют такой электропривод малой мощности в электрифицированном инструменте, специальном строительном оборудовании, медицинской и сложной бытовой технике. Кроме того, КПД двигателей малой мощности составляет от 30 до 60%, оставляя сравнительно большие возможности для его повышения, особенно в регулируемом электроприводе, а, следовательно, имеется значительный резерв экономии электроэнергии и, главное, достижимый. Но, следует отметить, что в настоящее время достаточно мало внимания уделяется к построению энергоэффективных систем управления электроприводами малой мощности, вследствие, незначительности эффекта энергосбережения в единичном случае и дешевизны таких приводов. И поэтому вопрос энергосберегающего управления таким электроприводом недостаточно исследован в настоящее время, в то время как, с точки зрения математического описания, однофазный коллекторный двигатель последовательного возбуждения, который в основном используется в массовом электроприводе малой мощности, является достаточно сложным объектом, вследствие наличия нелинейностей и отчасти непредсказуемой нагрузки на валу двигателя.

Однофазные коллекторные двигатели (ОКД) последовательного возбуждения малой мощности находят широкое применение в электрифицированном инструменте и устройствах сложной бытовой техники. Наличие таких качеств, как мягкие механические характеристики и большая перегрузочная способность по моменту, по большей части и определяют широкое применение этих электродвигателей.

Известно, что для обеспечения оптимального режима, с точки зрения энергетики, электрифицированного инструмента и сложной бытовой техники, и повышения срока службы рабочего органа, рабочий процесс необходимо производить на определенной установившейся скорости, которая



для каждого материала разная [2]. Поэтому, актуальной становится задача синтеза закона управления, позволяющего получать требуемые механические характеристики электропривода и оптимизировать энергопотребление в рабочем цикле.

### Функциональный синтез нелинейной обратной связи для системы стабилизации скорости ОКД

При реализации регулируемого электропривода на основе ОКД возникают определённые трудности с формированием требуемых статических и динамических характеристик и, в частности, с созданием систем стабилизации скорости. Ряд разработчиков (Bosch, Merloni Progetti и другие) предложил использовать косвенное измерение скорости двигателя. Для этого, как правило, необходимо измерять внутренние координаты электропривода. Одним из возможных решений было бы использование обратной связи по ЭДС вращения двигателя, но в приводах с ОКД последовательного возбуждения такая связь является трудно реализуемой из-за слабовыраженной зависимости ЭДС от частоты вращения, кроме того, в присущих для данного типа привода режимах прерывистого тока ЭДС равна нулю. По тем же причинам не могут найти применения обратная связь по напряжению двигателя, а также осуществление стабилизации частоты вращения путем отслеживания частоты коллекторных пульсаций напряжения. Удобным является применение положительной обратной связи по току двигателя. Недостатком такого типа обратной связи служит то, что сигнал на её выходе не несет полной информации о частоте вращения и её изменениях, вызванных отдельными возмущениями (нагрев обмоток, изменение напряжения сети).

Для решения описанных проблем авторами предлагается использовать структуру, формирующую сигнал обратной связи в виде частного от текущих значений тока и частоты вращения двигателя при импульсном питании последнего. Для этого измеряется время спада ЭДС самоиндукции двигателя до нуля. Это время с большой степенью точности пропорционально значению тока якоря и обратно пропорционально частоте вращения двигателя [3]. Достоинством указанного метода является возможность учесть большое число возмущений, в том числе нагрев обмоток двигателя, изменение напряжения сети и т.д.

Машина постоянного тока последовательного возбуждения в двигательном режиме описывается следующими уравнениями [4]:

$$U_C(t) = (R_A + R_B) \cdot i(t) + (L_A + L_B) \frac{di(t)}{dt} + L_{AB} \cdot i(t) \cdot \omega(t) \quad (1)$$

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = M_{ДВ} - M_C - B_m \cdot \omega(t) \quad (2)$$

где  $U_c(t)$  - напряжение питания двигателя (сети), В;  $i(t)$  - ток двигателя, А;  $\omega(t)$  - угловая частота вращения двигателя, 1/с;  $R_{я}$  - активное сопротивление обмотки якоря, Ом;  $R_B$  - активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом;  $L_{я}$  - индуктивность обмотки якоря, Гн;  $L_B$  - индуктивность обмотки возбуждения, Гн;  $L_{яВ}$  - взаимная индуктивность между обмотками якоря и возбуждения, Гн;  $J$  - суммарный момент инерции электродвигателя и рабочего органа, кг·м<sup>2</sup>;  $M_{дв}$  - электромагнитный момент двигателя, Н·м;  $M_c$  - момент нагрузки и постоянный момент трения двигателя, Н·м;  $B_m \cdot \omega(t)$  - переменный момент трения (зависит от скорости вращения), Н·м,  $B_m$  - коэффициент трения, Н·м·с.

Время спада ЭДС ОКД до нуля прямо пропорционально электромагнитной постоянной времени двигателя и измерение её производится в момент, когда транзистор ШИП выключен и двигатель отключен от сети, а ток якоря протекает по, шунтирующей якорь, разрядной цепочке.

Постоянная времени двигателя определяется выражением [5]:

$$T_{окд} = \frac{L_{яц}}{R_{яц} + L_{яВ} \cdot \omega} = T_{э} \frac{1}{1 + b \cdot \omega} \quad (3)$$

Из представленных уравнений видно, что для поддержания стабильной скорости вращения двигателя необходимо поддерживать постоянным время спада ЭДС самоиндукции до нуля. Это осуществляется регулированием ширины импульсов питающего напряжения.

Электропривод подключается к бытовой питающей сети напряжением 220 В (50 Гц), которое выпрямляется неуправляемым выпрямителем. Затем выпрямленное напряжение поступает на вход нереверсивного широтно-импульсного преобразователя (ШИП) с симметричным законом управления.

Непосредственно к ШИП подключается ОКД, с которого снимаются значения его внутренних координат. В блоке нелинейной обратной связи, вычисляется значение электромагнитной постоянной времени в каждый период и формируется пропорциональный ей управляющий сигнал для ШИП.

При построении модели был синтезирован новый блок, на имеющихся в библиотеке Simulink элементах, реализующий функциональную зависимость электромагнитной постоянной времени от частоты вращения. При моделировании двигателя постоянного тока последовательного возбуждения была учтена кривая намагничивания двигателя, посредством изменения структуры блока двигателя постоянного тока. Модель представлена на рис. 1.

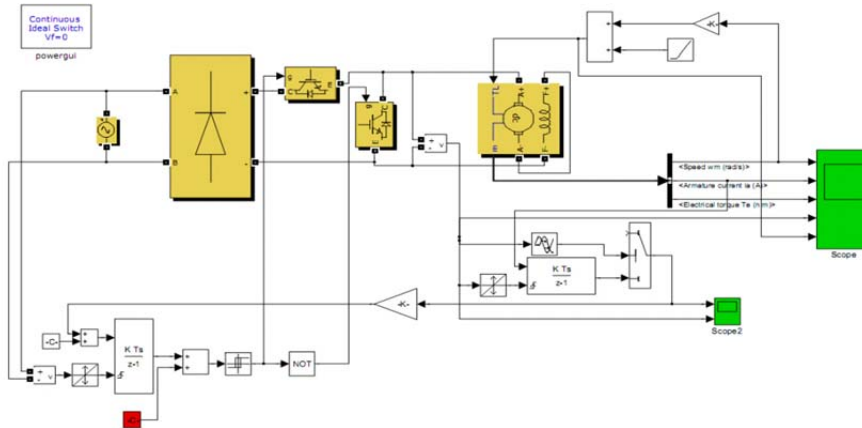


Рис. 1. Модель системы стабилизации скорости в Simulink

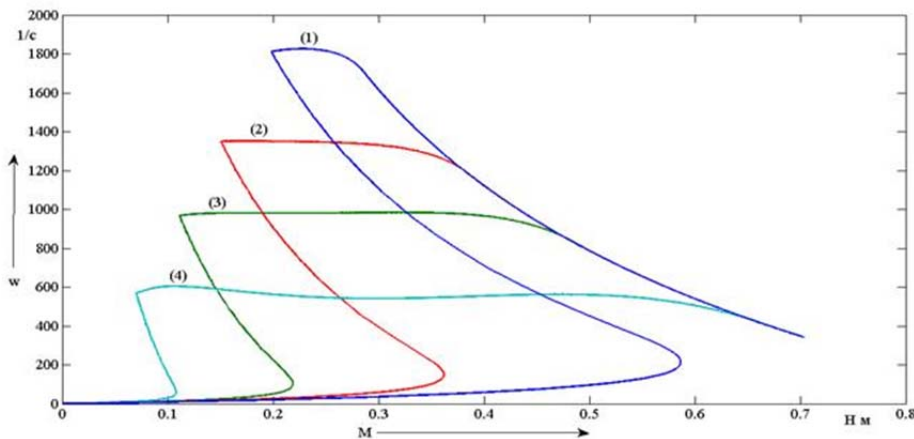


Рис. 2. Семейство статических характеристик

На рис. 2 представлено семейство механических характеристик разработанной системы управления с нелинейной обратной связью.

Из рисунка видно, что чем выше скорость работы, тем больше момент потерь двигателя. Это объясняется тем, что основная составляющая момента потерь – момент трения, зависит от скорости двигателя.

Из анализа статических механических характеристик следует, что модуль жесткости лежит в пределах:  $|\beta| = 1 \cdot 10^6 \div 1 \cdot 10^9$

Динамические характеристики представлены на рисунке 3 для механической характеристики (3) при линейно нарастающем моменте нагрузки. На этом рисунке представлены графики основных координат электропривода: угловая частота вращения, ток двигателя, электромагнитный момент двигателя, момент нагрузки и напряжение питания. В момент времени 3 с. подается линейно нарастающий статический момент.

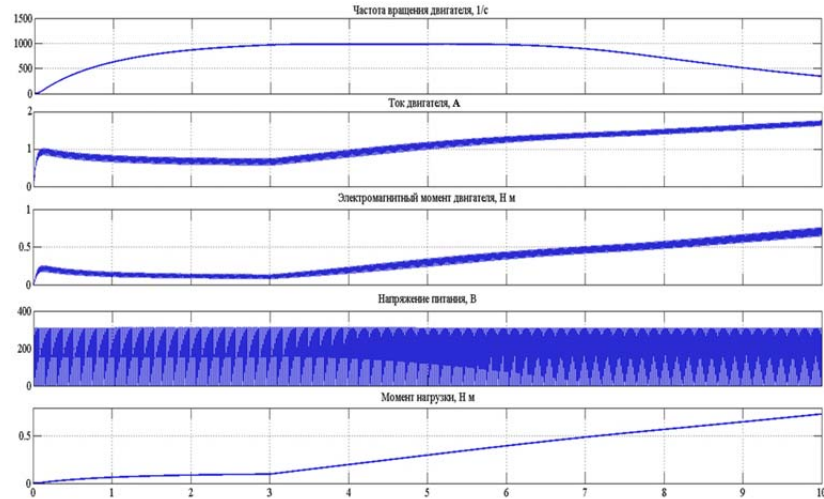


Рис. 3. Динамические характеристики основных координат ОКД

### Определение закона оптимального управления

Для определения закона управления, рассмотрим структуру «управляемый преобразователь – двигатель последовательного возбуждения» в относительных единицах. Тогда основное уравнение движения ЭП в системе относительных единиц имеет вид:

$$\mu = \frac{dv}{d\tau} + \mu_c$$

Задачу оптимального управления ЭП можно сформулировать следующим образом: изменить скорость двигателя от значения  $v_1$  до  $v_2$  так, чтобы за произвольное время переходного процесса энергия, потребляемая от преобразователя, была минимальной. Для этого необходимо обеспечить максимум динамическому КПД:

$$\eta(\tau) = \frac{\int (\mu_c \cdot v) \cdot d\tau}{\int (\mu_c \cdot v + \Delta P) \cdot d\tau}$$

где  $\Delta P$  - это потери в ЭП: электрические  $\Delta P_{эл}$  и механические  $\Delta P_{мех}$ .

Очевидно, что максимум данному функционалу будет обеспечиваться при следующем условии:

$$\int \left( \mu_c \cdot v + \frac{u^2}{\rho} + \Delta P_{мех} \right) d\tau \rightarrow \min$$

Выразив из уравнения движения  $dt$  и заменив пределы интегрирования, получим:



$$\int_0^{\tau_{\text{пл}}} \left( \mu_c \cdot v + \frac{u^2}{\rho} + \Delta P_{\text{МЭХ}} \right) d\tau = \int_{v_1}^{v_2} v \cdot \left( \mu_c + \frac{u^2}{\rho} + \Delta P_{\text{МЭХ}} \right) \cdot \frac{dv}{\mu - \mu_c}$$

В тех случаях, когда  $\mu_c$  является функцией скорости и не зависит явно от времени и пути, минимум определенного интеграла достигается при том условии, что при каждом значении скорости на интервале  $v_1 - v_2$  момент двигателя обеспечивает минимум подынтегрального выражения:

$$\frac{d}{d\mu} \left[ \left( v \cdot \mu_c + \frac{u^2}{\rho} + \Delta P_{\text{МЭХ}} \right) / (\mu - \mu_c) \right] = 0$$

Тогда, при постоянной скорости и пренебрегая механическими потерями, решение имеет вид:

$$u = \pm \sqrt{v \cdot \rho \cdot \mu + \rho \cdot \Delta P_{\text{МЭХ}}} = \pm \sqrt{a \cdot \mu}$$

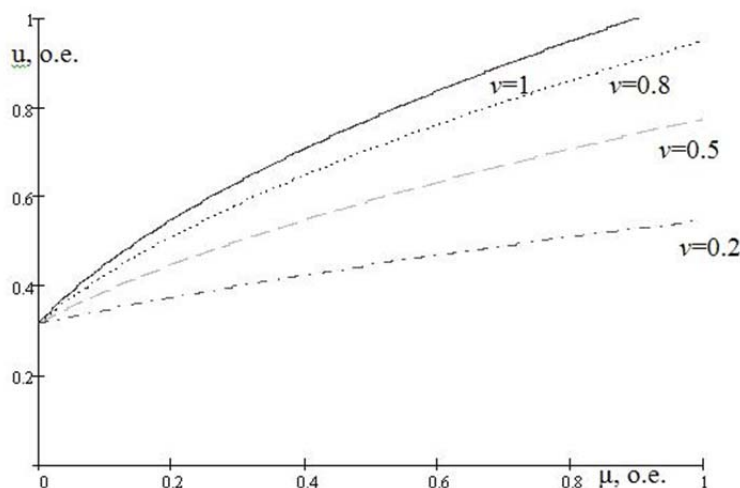


Рис. 4. Кривые питающего напряжения в функции момента при разных значениях скорости

Как видно из рис. 4, с ростом нагрузки на валу двигателя, действующее значение питающего напряжения должно возрастать по параболическому закону. Такая функция изменения действующего значения питающего напряжения будет оптимальной с точки зрения выполнения энергетического критерия.

При питании однофазного коллекторного двигателя от транзисторного преобразователя в работу машины вносится ряд специфических особенностей, обусловленных пульсациями питающего напряжения: появление дополнительных потерь в меди обмоток, стали магнитопровода и конструктивных элементах, что обусловлено наличием переменных составляющих в токе якоря и магнитных потоках машины.



Исследования показывают [6], что с увеличением частоты якорного тока резко возрастает активная составляющая  $z$ , что связано с эффектом вытеснения тока в меди самих обмоток, потерями на вихревые токи и гистерезис в стали и конструктивных элементах. В целом же, потери в ОКД, обусловленные переменной составляющей тока, зависят от конструктивного исполнения, параметров управления и рабочего режима. Суммарные дополнительные потери в ОКД при наличии пульсирующих составляющих в токе могут составлять величину до 60% от основных потерь при питании машины постоянным («гладким») током. Повышение коммутационной устойчивости и одновременно снижение дополнительных потерь может достигаться повышением частоты квантования, которое довольно просто реализуется в ШИП. Одним из ограничений, накладываемых на максимальную частоту квантования, является рост потерь в преобразователе.

На основании разработанной системы стабилизации скорости и закона управления было произведено исследование влияния параметров широтно-импульсной модуляции на энергетику системы управления. Частота модуляции задавалась 300, а ширина средних импульсов варьировалась от нуля до максимальной. Одним из найденных решений, является способ модуляции в системе управления двигателем, в котором импульсы питающего напряжения модулируются инверсно синусоидальному сигналу. Для сравнения и анализа результатов было произведено моделирование системы управления ОКД на основе полууправляемого выпрямителя, как одной из наиболее распространенных систем управления ОКД в бытовых и промышленных устройствах. Ниже представлены кривые тока за период и гармонические спектры для систем с полууправляемым выпрямителем и с ШИП при разработанном способе управления.

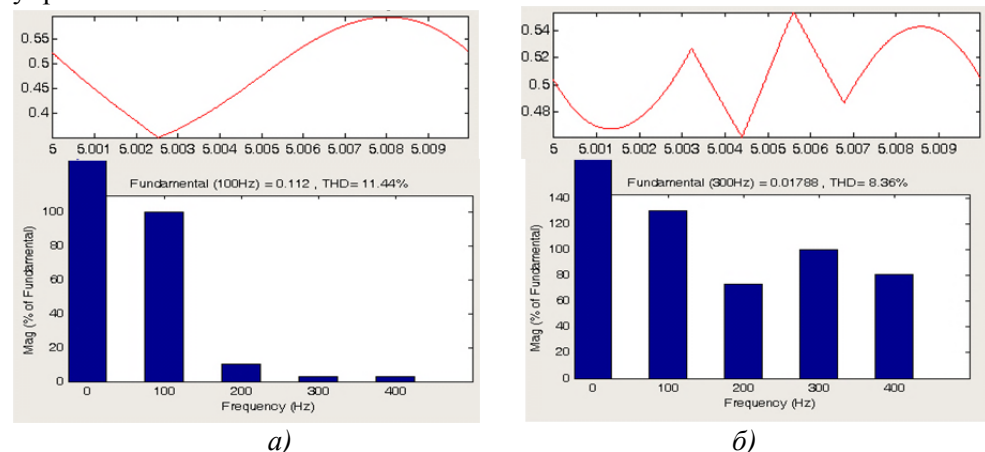


Рис. 5. Кривые тока и спектры гармонических составляющих за период выпрямленного напряжения системы с выпрямителем (а) и системы с ШИП (б)





Из рис. 5 видно, что в системе с ШИП с разработанным способом управления постоянная составляющая тока двигателя на 30% больше чем в системе с выпрямителем при том, что суммарный коэффициент гармоник (THD) тока уменьшился более чем на 3%.

Оценка энергоэффективности производилась путем построения рабочих характеристик  $\eta(M)$ . Для систем с полупроводящими выпрямителями эта характеристика получена экспериментально в [7]. Рассчитанные рабочие характеристики представлены на рис. 6.

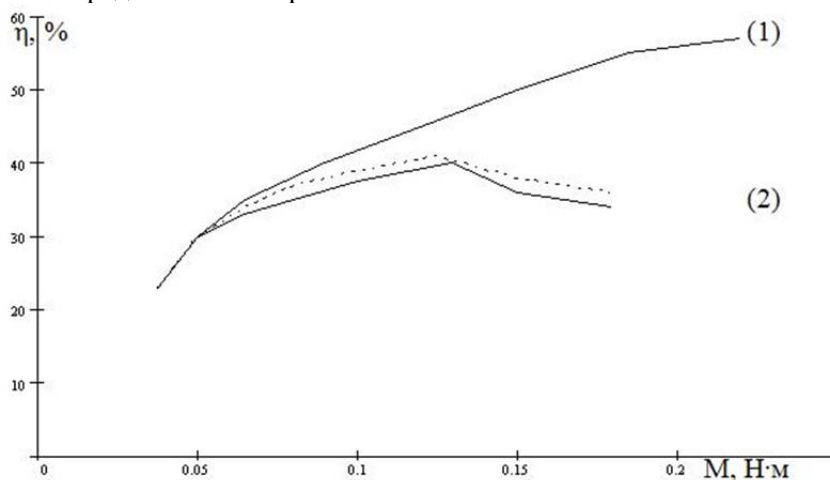


Рис. 6. Зависимость КПД электропривода от момента на валу: (1) – Расчетная кривая для системы с ШИП; (2) – Кривые для системы с полупроводящим выпрямителем (расчетная (пунктир) и экспериментальная)

### Заключение

Таким образом, из представленных результатов можно сделать следующие выводы:

- статические и динамические характеристики однофазных коллекторных двигателей требуют нелинейной коррекции;
- введение положительной обратнопропорциональной обратной связи по скорости двигателя позволяет обеспечить жесткость механических характеристик на уровне  $\beta = |10^6 \div 10^9|$  при изменении нагрузки на валу во всем рабочем диапазоне;
- оптимальным законом изменения напряжения на входе электродвигателя, согласно критерию минимума потерь, является его квадратичная зависимость от электромагнитного момента;
- при переменном моменте нагрузки на валу однофазного коллекторного двигателя целесообразно использовать понятие динамического КПД, предложенный способ управления и структура электропривода позволяет повысить динамический КПД на величину до 20%, при одновременном повышении качества спектра тока, влияющего на внешнюю сеть, более чем на 3%.



### Библиографические ссылки

1. *Зайцев А.И.* Регулируемый электропривод и его роль в энергосбережении / А.И. Зайцев, Ю.С. Лядов // Электротехнические комплексы и системы управления - 2006. - №2 – С. 35-37.
2. Таблица определения скорости сверления. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.woodmagazine.com/wood/story.jhtml>.
3. *Мешков А.С., Суздорф В.И.*, Функциональный синтез нелинейных обратных связей систем массового электропривода / Международный симпозиум «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы»: материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (Комсомольск-на-Амуре, 21-22 октября 2010 года): В 5 т. т.3 / Редкол.: А.М. Шпилев (отв. ред.) и др. - Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. - С. 90 - 92.
4. *Krause P.C.*, Analysis of electric machinery and drive systems / Krause P.C., Wasynczuk O., Sudhoff S.D., - IEEE Press 2002. - С. 76-84.
5. *Мешков А.С., Суздорф В.И.*, Формирование характеристик систем массового электропривода / Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике №3. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. - С. 57 – 61.
6. *Барков В.А.* Полупроводниковые устройства для управления электрическими машинами постоянного тока / Учебное пособие, Ленинград, 1982.
7. *Суздорф В.И.* Синтез структуры и алгоритмов управления однофазным электроприводом с двигателем последовательного возбуждения малой мощности / диссертация на соискание ученой степени к.т.н., Томск, 1984.