## Многокритериальное управление машиной двойного питания с оптимизацией по энергетическим критериям

В современной промышленности широко используется автоматизация технологических процессов, где в качестве исполнительного устройства наибольшее распространение получил электропривод переменного тока, который обладает бесспорными преимуществами в надежности и себестоимости.

В таких электроприводах для управления двигателем наиболее часто применяют преобразователи частоты с автономными инверторами напряжения, позволяющие как регулировать координаты, так и оптимизировать режимы работы.

Преобразователи частоты могут реализовывать различные законы управления двигателем, в том числе многокритериальные, позволяющие при правильной настройке добиваться одновременно высокого качества регулирования координат и достижения высоких показателей по дополнительным критериям, например энергетическим.

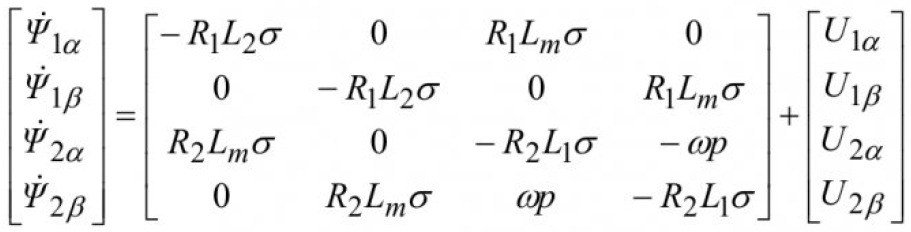
Для создания требуемого многокритериального закона управления необходимо использовать какой-либо нелинейный метод теории автоматического управления, например метод скоростного градиента [1], зарекомендовавший себя в задачах управления электроприводом [2-5].

В качестве объекта управления для данной задачи целесообразно использовать машину двойного питания, поскольку существуют апробированные методики перехода от модели машины двойного питания к моделям различных типов двигателей переменного тока.

### Вывод закона управления

Согласно [1], процедура синтеза закона управления начинается с представления математического описания объекта управления в пространстве состояний.

**Следовательно, получим следующую модель машины двойного питания:**



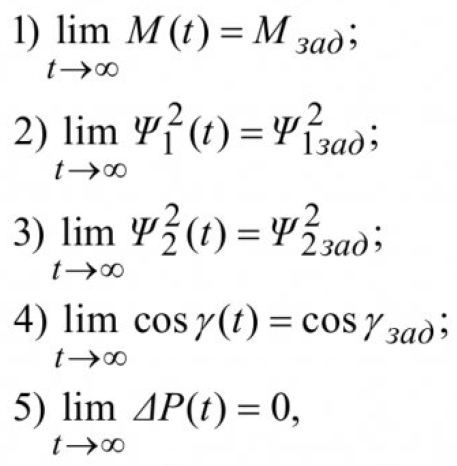
**где**

* Ψ1α, Ψ1β, Ψ2α, Ψ2β - составляющие векторов потокосцепления статора и ротора в неподвижной системе координат α-β.
* U1α, U1β, U2α, U2β - составляющие векторов напряжения, подводимого к статору и ротору.
* ω - угловая скорость двигателя.
* р - число пар полюсов.
* R1, R2, L1, L2 - сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора.
* Lm -взаимная индуктивность.
* α= 1/(L1L2- Lm2).

**Цель управления зададим в виде:**

* Набора предельных соотношений, при этом основной (технологической) целью управления выберем поддержание на заданном уровне электромагнитного момента двигателя.
* Также зададим дополнительные цели управления, позволяющие добиться оптимизации режима работы по энергетическому критерию, а именно регулирование амплитуд векторов потокосцеплений статора и ротора, задание угла между ними и минимизация омических потерь.

**На основании чего получим следующие выражения:**

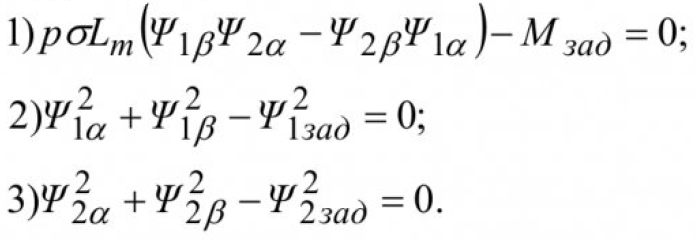


**где**

* M, Мзад - текущий и заданный электромагнитный момент.
* Ψ1, Ψ1зад - текущая и заданная амплитуда вектора потокосцепления статора.
* Ψ2, Ψ2зад - текущая и заданная амплитуда вектора потокосцепления ротора.
* y, узад - текущий и заданный угол между потокосцеплением статора и ротора.
* ΔР - величина омических потерь.

Для дальнейшей работы с целями управления, их следует выразить через переменные состояния.

**С учетом этого первые три цели запишутся следующим образом:**



**Для выражения четвертой цели управления перейдем от системы координат α-β к системе координат u-ν неподвижной относительно вектора потокосцепления статора, которая показана на рисунке 1:**

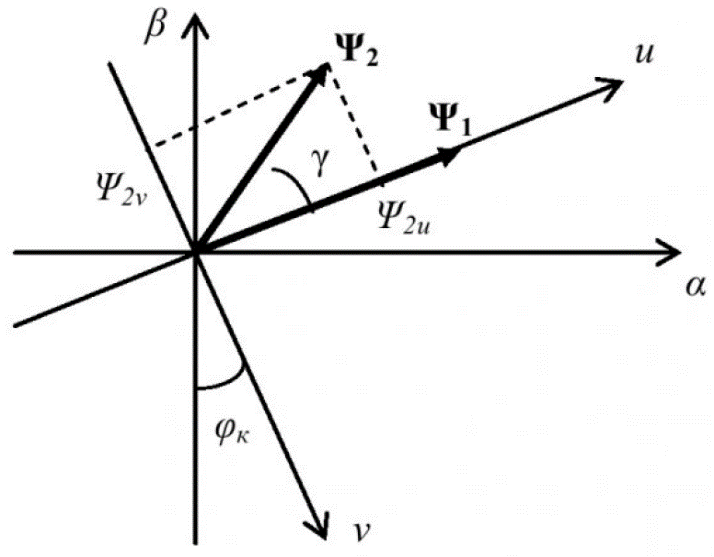
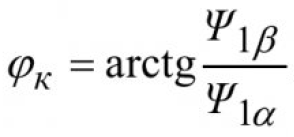
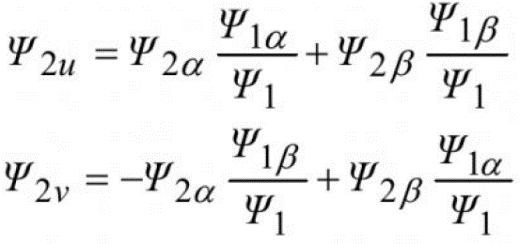


Рисунок 1 – Потокосцепления статора и ротора в системе координат u-ν

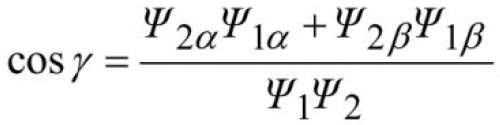
**Угол между системами координат α-β и u-ν определяется выражением:**



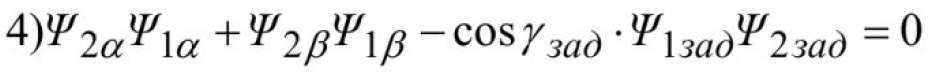
**Тогда с учетом координатных преобразований проекции вектора потокосцепления ротора в системе координат u-ν равны:**



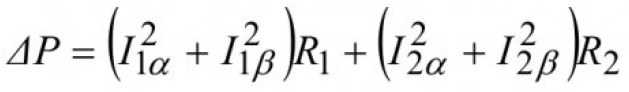
**Исходя из этих проекций, косинус угла между потокосцеплениями статора и ротора определяется по формуле:**



**Что определяет запись четвертой цели управления:**



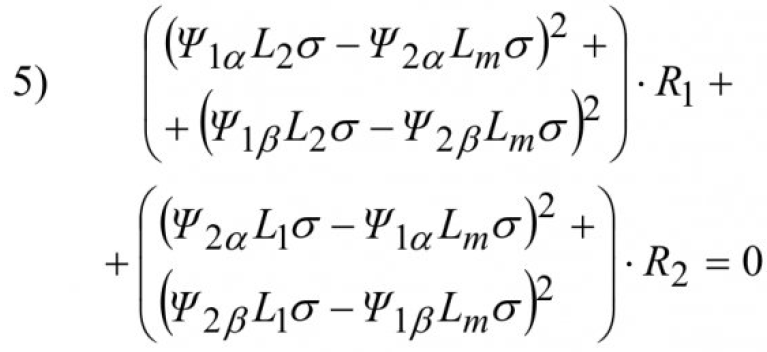
**Для вывода пятой цели управления воспользуемся уравнением, описывающим омические потерь:**



**где**

* I1α, I1β, I2α, I2β - составляющие векторов тока статора и ротора.

**Выразив данное уравнение через переменные состояния, получим искомую цель управления:**



Определив для приведенных целей с 1 по 5 скорость изменения локального целевого функционала, найдем такое изменение векторов напряжения, подводимого к статору и ротору, реализация которого автономным инвертором напряжения обеспечит движение объекта управления в пространстве состояний к достижению целей управления.

**Таким образом, искомый многокритериальный закон управления задается следующими выражениями:**



**где**

* δ1, δ2, δ3, δ4 - коэффициенты усиления, определяющиеся исходя из максимально допустимого значения напряжения.
* h1, h2, h2, h4, h5 - весовые коэффициенты, определяющие значимость каждой из целей управления.

**Приведенные выражения описывают, каким образом должна изменяться производная составляющих напряжения, подводимого к статору и ротору:**

* Следовательно, разработанный закон управления может быть реализован автономным инвертором напряжения, если результат вычисления правых частей закона подвергнуть преобразованию с использованием интегрального регулятора.
* Однако помимо интегрального регулятора возможны другие реализации. Так, использование для преобразования пропорционально-интегрального или знакового регуляторов также позволяет достигнуть целей управления.
* Разработанный многокритериальный закон управления по определению избыточен. Например, при конкретных заданных Мзад, Ψ1зад и Ψ2зад двигатель может занять только одно состояние с соответствующим ему y.

Поскольку для различных типов двигателей цели управления, обеспечивающие оптимизацию по энергетическому критерию, удобно задавать в различных формах, чтобы многокритериальное управление было результативным.

**Соответственно, достаточно реализовывать три цели управления:**

* Обязательно-технологическую.
* Две на выбор.

### Вычислительные эксперименты

**Экспериментальное исследование разработанного многокритериального закона управления выполнено с использованием компьютерной модели, в которой в качестве объекта управления выступает машина двойного питания, у которой напряжение питания формируется:**

* Либо с помощью широтно-импульсной модуляции при использовании линейных регуляторов.
* Либо за счет непосредственного управления ключами инвертора при использовании знакового регулятора.

Компьютерная модель реализована в среде программирования Delpfi. Моделирование производилось для двигателя марки 4А80А4УЗ, мощность которого составляет 1,1 кВт.

**В вычислительных экспериментах для преобразования правых частей закона управления применялись регуляторы следующих типов:**

* Интегральный (И).
* Пропорционально-интегральный (ПИ).
* Знаковый (3).

Указанные регуляторы исследовались при всех возможных комбинациях заданий целей управления. Исходя из условия, что исходные значения напряжения за один шаг расчета не превышало максимального значения.

**Был определен допустимый диапазон весовых коэффициентов, представленный в таблице 1:**

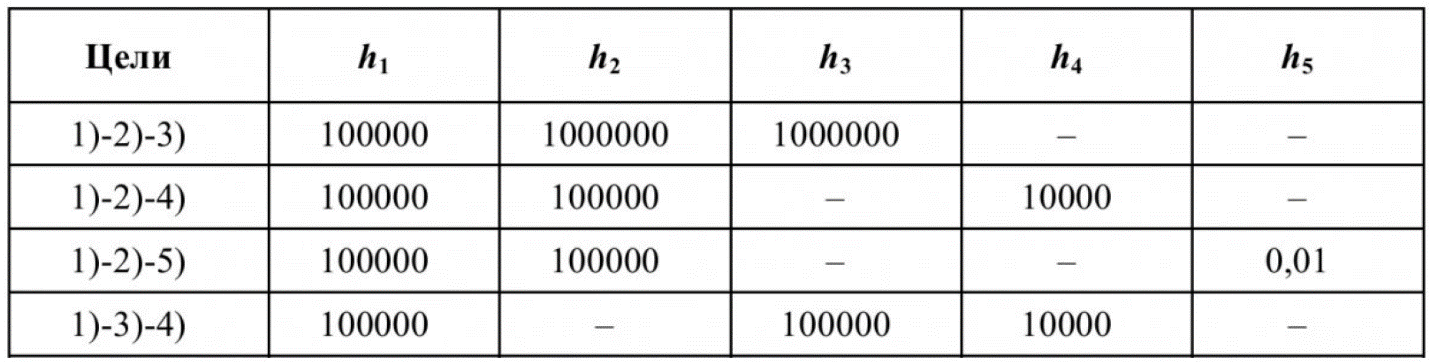


Таблица 1 – Значение весовых коэффициентов при различных комбинациях целей управления

Для оценки качества регулирования сравнивались переходные процессы, протекающие при ступенчатом приложении задания.

**В качестве заданных значений при моделировании выбраны:**

* Мзад=7 Н\*м.
* Ψ1зад = 1 Вб.
* Ψ2зад = 1 Вб.

В свою очередь величина угла yзад определялась таким образом, чтобы амплитуды векторов потокосцепления статора и ротора при работе системы управления в отсутствии целей 1) или 2) стремилась к указанным выше значениям.

**На рисунке 2 приведены результаты моделирования для сочетания целей 1)-2)-3) и 1)- 4)-5):**

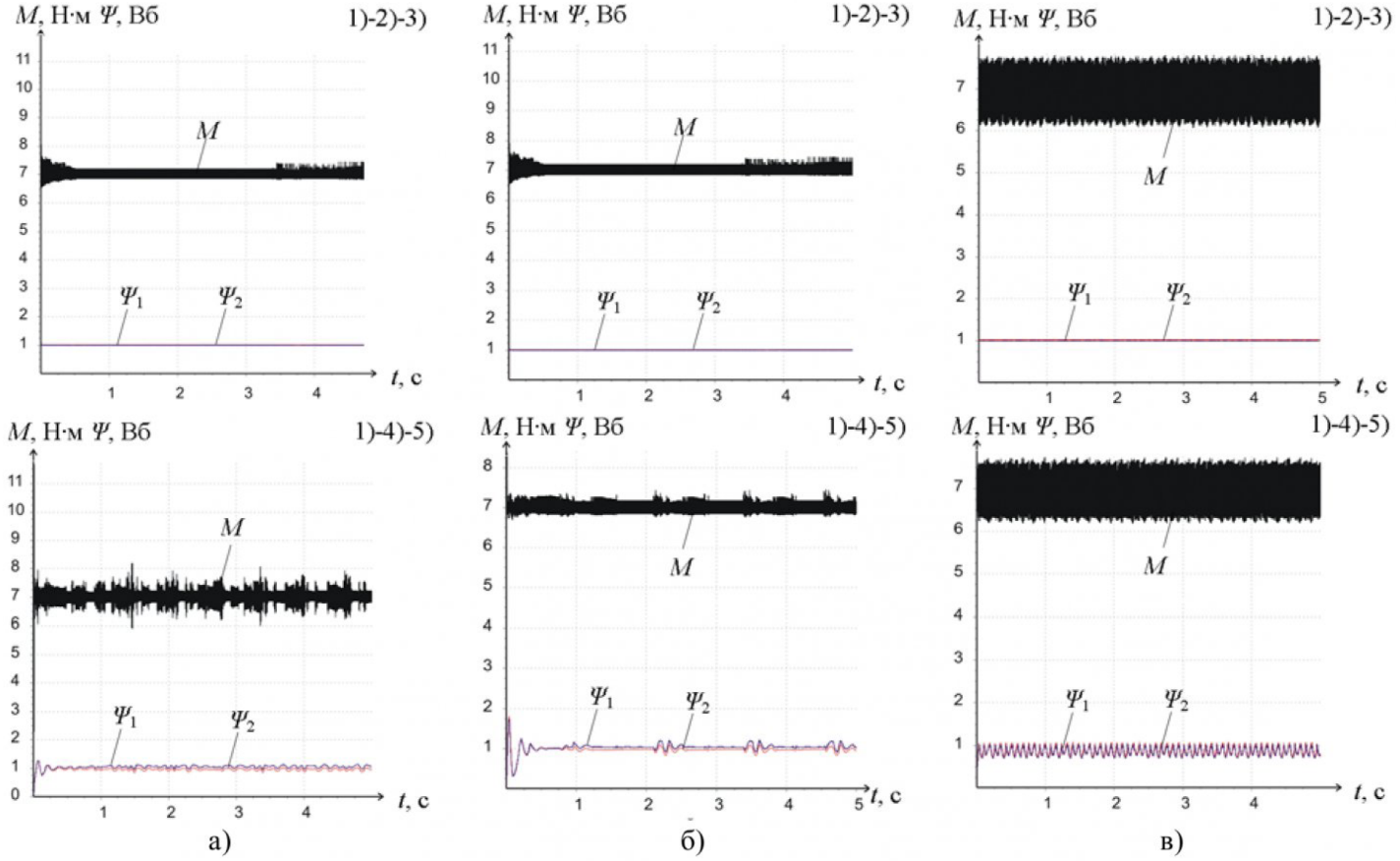


Рисунок 2 – Переходные процессы

**где**

* а) И регулятор.
* б) ПИ регулятор.
* в) 3 регулятор.

Количественная оценка в каждом вычислительном эксперименте проводилась измерением статической и динамической точности регулирования электромагнитного момента, потокосцеплений ротора и статора.

**Сравнительные показатели качества регулирования представлены в таблицах со 2 по 4:**



Таблица 2 – Ошибки регулирования электромагнитного момента

Оценивая по таблице 2 качество регулирования электромагнитного момента можно сделать заключение, что для большинства видов регуляторов и комбинаций целей управления достигается высокая статическая точность, а ошибка регулирования в основном менее одного процента.

Исключением являются результаты при использовании ПИ регулятора, где статическая ошибка составляет около двух процентов.

В динамике наибольшее отклонение наблюдается в начале пуска в течение первых 0,04 секунд переходного процесса. При этом максимальное отклонение от заданного значения наблюдается при использовании интегрального регулятора, особенно задавая цели управления 2) и 3).

Наилучшие результаты показывает использование знакового регулятора.

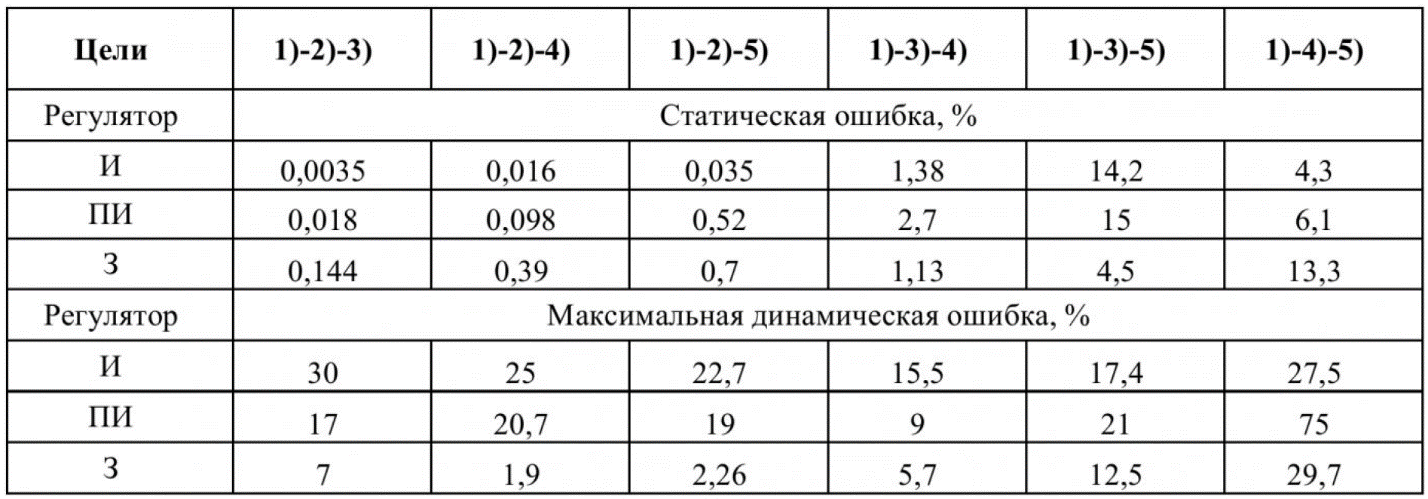


Таблица 3 – Ошибки регулирования потокосцепления статора



Таблица 4 – Ошибки регулирования потокосцепления ротора

При анализе статической точности регулирования потокосцепления статора и ротора изначально можно предположить, что наилучший результат будет наблюдаться в том случае, если в комбинации целей управления присутствует 2) или 3) соответственно. Данное предположение полностью согласуется с результатами, представленными в таблицах 3 и 4.

Что касается динамической точности, так же, как и при регулировании электромагнитного момента, лучшие результаты показывает использование 3 регулятора.

Учитывая, что при синтезе закона регулирования ставилась задача обеспечения оптимизации по энергетическим критериям, помимо качества регулирования целесообразно оценить электрические потери, характерные для каждого из видов регуляторов и комбинаций целей управления. Для этого во всех описанных выше опытах за фиксированное время, выбранное равным 2,5 с, рассчитывалась энергия электрических потерь.

**Результаты расчета приведены в таблице 5:**

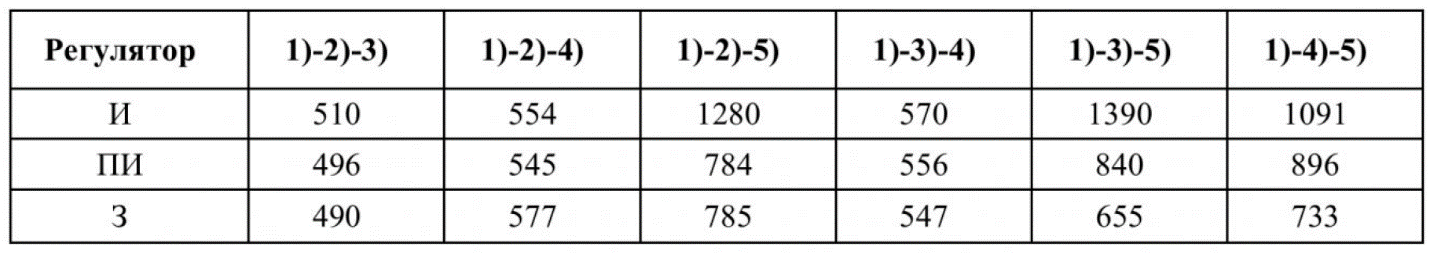


Таблица 5 – Энергия электрических потерь, Вт

**Учитывая, что при вычислительных экспериментах выбирались такие условия, чтобы электромагнитный момент и потокосцепления двигателя стремились к одинаковым значениям во всех опытах, по данным, приведенным в таблице 5, можно заключить, что:**

* Для разработанного закона управления наилучшей по энергетическим критериям комбинацией целей управления является 1)-2)-3) при реализации всех типов регуляторов.
* Использование цели 5), представляющей собой наиболее очевидный путь достижения энергоэффективности, является наименее действенным.

Причиной этого являются различия в характере переходных процессов, обеспечиваемых при разных сочетаниях целей управления. Так, наличие колебательности при использовании цели 5) вызывает дополнительные переходные процессы по токам статора и ротора, вследствие чего увеличивается значение электрических потерь.

Результаты вычислительных экспериментов показали работоспособность разработанного многокритериального закона управления машиной двойного питания, а также возможность его оптимизации по энергетическим критериям с использованием в качестве целей управления поддержание на заданном уровне электромагнитного момента двигателя, а также амплитуд векторов потокосцеплений статора и ротора.

При этом наилучшие результаты по совокупности энергетических, статических и динамических показателей качества достигаются при использовании знакового регулятора для реализации преобразователем частоты напряжения, подводимого к статору и ротору.

### Список литературы

1. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. - СПб.: Наука, 2003. - 208 с.
2. Многокритериальное управление асинхронным электроприводом / В.М. Завьялов, А.А. Неверов, И.Ю. Семыкина // Вестник КузГТУ. - 2005. - №1 - С.81-84.
3. Реализация системы регулирования угловой скорости асинхронного электродвигателя на основе метода скоростного градиента / А.В. Стародуб, И.Ю. Семыкина // Вестник КузГТУ. - 2005. - №6. - С. 69-72.
4. Градиентное управление многодвигательным асинхронным электроприводом / И.Ю. Семыкина, В.М. Завьялов, М.А. Глазко // Известия Томского политехнического университета. - 2009. - Т. 315. - № 4. - С. 65-69.
5. Семыкина И.Ю. Градиентное управление в решении основных задач электропривода // Вестник КузГТУ. - 2010. - №1 - С. 99-103.

Источник: Многокритериальное управление машиной двойного питания с оптимизацией по энергетическим критериям / И.Ю. Семыкина, С.Г. Нехлебова // Вестник КузГТУ. - 2011. - №6. - C. 40-44.