

УДК 621.313

© 2012 г. **Г.М. Гринфельд**, канд. техн. наук,  
**С.Н. Иванов**, д-р техн. наук  
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)  
**М.А. Шпилев**  
(Петербургский государственный университет путей сообщения)

## **ВЫБОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАПСУЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ЕГО СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ**

Приведены результаты анализа структурной схемы капсулированного электромеханического преобразователя. Схема позволяет обосновать выбор системы управления и смоделировать в среде MATLAB Simulink переходные процессы при реализации энергосберегающих режимов работы преобразователя.

**Ключевые слова:** система управления, структурная схема, нечеткая логика.

### **Введение**

Одной из современных тенденций развития энергетического оборудования является повышение его эффективности средствами управления. Как известно, основная цель разработки системы управления – изменение характеристик объекта управления (ОУ) во времени по заданному закону, в частных случаях это может быть стабилизация выходных управляемых характеристик на заданных уровнях при воздействии внешних и/или внутренних возмущений, экстремальное управление или оптимизация по заданному критерию. Теоретические основы синтеза систем управления (СУ) для таких устройств, базируются на анализе процессов, характерных для рассматриваемых объектов, а практическая реализация строится с учетом расчетных и эксплуатационных параметров последних. Соответственно техническая сложность ОУ определяет структуру СУ, а ее эффективность зависит непосредственно от степени учета взаимодействия электромагнитных, механических, тепловых, гидравлических процессов, которые могут быть приняты в качестве контролируемых параметров синтезируемой системы.

### **Характеристика объекта управления**

Управляемое электромеханическое преобразование энергии используется практически во всех видах электротехнического оборудования, начиная от мощных электрических машин переменного тока электростанций и заканчивая приво-

дами бытовых машин и приборов. Однако особый интерес представляют капсулированные электромеханические преобразователи (КЭМП), используемые в наиболее тяжелых эксплуатационных условиях. Примером таких объектов являются разработки фирмы Siemens, полученные на основе изучения опыта работы различных компаний нефтегазовой отрасли и требований, предъявляемых к оборудованию и условиям его эксплуатации.

Особенностью принципиально новых агрегатов является наличие внутри пространственной рамы модулей систем обеспечения, единого герметичного корпуса исполнительного механизма и электропривода с общим ротором на магнитных опорах. Секция частотно регулируемого электропривода располагается в верхней части агрегата, электропривод и исполнительный механизм выполнены на монолитном валу, установленном в двух герметичных радиальных активных магнитных опорах, причем верхняя скомпонована с осевым магнитным подшипником. Лобовые части статорных обмоток приводного двигателя имеют изгибы под углом  $90^\circ$ , медные обмотки короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя вложены и зафиксированы внутри вала и имеют специальное защитное покрытие. Статор электропривода отделен от прямого воздействия агрессивной среды специальным неподвижным элементом (НЭ), установленным в зазор между статором и ротором. Охлаждение обмоток статора осуществляется при помощи внешнего водомасляного теплообменника с использованием трансформаторного масла. Опыт эксплуатации капсулированных агрегатов Siemens выявил следующие их преимущества перед агрегатами традиционной конструкции:

- сокращение необходимой площади установки до 40 %;
- повышение эффективности за счет исключения редуктора;
- сокращение количества узлов и эксплуатационных затрат;
- герметичность и стойкость к агрессивным средам.

В то же время, несмотря на то, что для асинхронных преобразователей с короткозамкнутыми обмотками характерны высокие надежность показатели, их очевидным недостатком является высокая потребляемая реактивная мощность и как следствие – низкий коэффициент мощности. Именно поэтому вызывает интерес использование в конструкции ротора постоянных магнитов, позволяющих не только снизить реактивную составляющую первичной мощности, но и улучшить выходные характеристики в целом. Очевидно, что наличие дополнительных элементов ОУ существенно усложняет процесс проектирования системы управления и приводит к необходимости ее предварительного анализа с учетом факторов неопределенности внешней среды и внутренних параметров объекта, а также неточности математической модели.

Создание регуляторов для таких объектов связано с большим числом входных и выходных переменных, введением в структуру регулятора перекрестных связей для достижения требуемого качества управления, а также необходимостью учета нелинейностей объекта, что является сложной задачей, решение которой целесообразно реализовать на основе анализа структурной схемы ОУ, позволяющей обосновать выбор и синтезировать СУ.

## Математическая модель объекта управления

Структурная схема строится на основе математической модели ОУ. Теоретические основы, позволяющие проектировать и создавать капсулированные преобразователи, базируются на анализе процессов, характерных для классических электромеханических преобразователей. При этом для проектирования, разработки и исследования КЭМП требуется математическая модель, адекватно описывающая электромагнитные, тепловые и механические процессы в КЭМП с учетом его конструктивных особенностей. Математическая модель КЭМП с постоянными магнитами строится с использованием обобщенной электрической машины путем замены реальной многофазной и многополюсной машины двухфазной двухполюсной машиной с взаимно ортогональными обмотками на статоре и на роторе [1]. Такой подход используют современные способы векторного управления при разложении входящих в модель векторов на проекции некоторой системы координат, связанной с соответствующим вектором потокосцепления. Для системы координат « $d$ - $q$ », неподвижной относительно вращающейся обмотки ротора, используются общепринятые обозначения:  $U_{1q}, U_{1d}$  – напряжения сетевой обмотки с частотой  $\omega_{0эл}$  соответственно по осям  $q$  и  $d$ ;  $U_{2q}, U_{2d}$  – напряжения короткозамкнутого неподвижного капсулирующего элемента по осям  $q$  и  $d$ ;  $U_{3q}, U_{3d}$  – напряжения короткозамкнутой вращающейся обмотки по осям  $q$  и  $d$ ;  $U_{4q}, U_{4d}$  – напряжения фиктивной обмотки возбуждения по осям  $q$  и  $d$ , связанной с системой постоянных магнитов.

Соответственно применительно к рассматриваемому устройству математическая модель капсулированного электромеханического преобразователя с постоянными магнитами имеет вид [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{1d} = R_1 \cdot i_{1d} + p(L_{2d} \cdot i_{2d} + M_{12d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{3d} + \psi_{24d}) - \\ \quad - \omega_{0эл} (L_{1q} \cdot i_{1q} + M_{12q} \cdot i_{2q} + M_{13q} \cdot i_{3q}), \\ 0 = R_2 \cdot i_{2d} + p(L_{2d} \cdot i_{2d} + M_{12d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{3d} + \psi_{24d}) - \\ \quad - \omega_{0эл} (L_{2q} \cdot i_{2q} + M_{12q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{3q}), \\ 0 = R_3 \cdot i_{3d} + p(L_{3d} \cdot i_{3d} + M_{13d} \cdot i_{1d} + M_{23d} \cdot i_{2d} + \psi_{34d}), \\ 0 = R_{м.вн} (Iw)_\phi + p(L_{м.вн} (Iw)_\phi + M_{14d} \cdot i_{1d} + M_{24d} \cdot i_{2d} + M_{34d} \cdot i_{3d}), \\ U_{1q} = R_1 \cdot i_{1q} + p(L_{1q} \cdot i_{1q} + M_{12q} \cdot i_{2q} + M_{13q} \cdot i_{3q} + \psi_{14q}) + \\ \quad + \omega_{0эл} (L_{1d} \cdot i_{1d} + M_{12d} \cdot i_{2d} + M_{13d} \cdot i_{3d} + \psi_{14d}), \\ 0 = R_2 \cdot i_{2q} + p(L_{2q} \cdot i_{2q} + M_{12q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{3q}) + \\ \quad + \omega_{0эл} (L_{1d} \cdot i_{1d} + M_{12d} \cdot i_{2d} + M_{13d} \cdot i_{3d} + \psi_{14d}), \\ 0 = R_3 \cdot i_{3q} + p(L_{3q} \cdot i_{3q} + M_{13q} \cdot i_{1q} + M_{23q} \cdot i_{2q} + \psi_{34q}), \\ U_{4q} = 0, \end{array} \right.$$

где  $R_i$  – соответствующие обмоткам активные сопротивления,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $L_{ik}$  – соответствующие обмоткам полные собственные индуктивности с учетом индуктивностей рассеяния,  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $k = d, q$ ;  $M_{lm}$  – взаимные индуктивности  $l = 1, 2, 3, 4$ ;  $m = 1, 2, 3, 4$ ;  $i_{jk}$  – составляющие токов в элементах КЭМП по осям  $q$  и  $d$ ,  $j = 1, 2, 3, 4$ ;  $k = d, q$ ;  $\psi_{lm}$  – составляющие потокосцепления по осям  $q$  и  $d$ ;  $i = 1, 2, 3, 4$ ;  $k = d, q$ ;  $\omega_{0эл}$  – угловая частота питающего напряжения.

Такая модель является универсальной и теоретически позволяет исследовать КЭМП как в установившихся, так и в переходных режимах работы. Для ее практической реализации необходимо знать первичные напряжения и параметры устройства (геометрические размеры, обмоточные данные и т.п.) и учесть, что коэффициенты, связанные с определяемыми величинами (активные сопротивления, индуктивности, взаимные индуктивности, определяемые расчетным или опытным путем), в рассматриваемой системе являются нелинейными функциями этих величин и зависят от выходных параметров ОУ.

Система (1) дополняется уравнением движения  $M_s = (1/p_{\text{ПАР}})J d\omega_p / dt \pm M_c$ , где  $\omega_p$  – частота вращения ротора;  $M_s$  – электромагнитный момент;  $M_c$  – момент сопротивления;  $J$  – момент инерции вращающихся элементов;  $p_{\text{ПАР}}$  – число пар полюсов преобразователя.

### **Структурная схема капсулированного электрохимического преобразователя**

Составление структурной схемы является самым важным этапом проектирования СУ, поскольку она наиболее полно отражает процессы преобразования различных видов энергии в ОУ [3], которая теоретически может быть взята за основу при синтезе его системы управления. Однако ее анализ показывает следующее.

Реализация СУ на основе математической модели (1) возможна только при ряде существенных допущений, влияющих на эффективность работы КЭМП. Так, модель характеризуется трудностью определения основных коэффициентов, нелинейностью, вычислительной сложностью и в целом отражает качественную сторону ОУ. Моделирование процессов в многообмоточных преобразователях в переходных режимах связано с необходимостью решения нелинейных дифференциальных уравнений высоких порядков, что можно реализовать лишь численными методами при заданных параметрах напряжения и всех сопротивлениях. Следует отметить, что численное моделирование дает приближенные результаты, так как математическая модель КЭМП, полученная на основе ЭМП, сама является приближенной, поскольку при ее выводе принимается ряд допущений:

магнитное поле, связанное с капсулирующим элементом, вторичной вращающейся короткозамкнутой обмоткой и постоянными магнитами, ограничено расчетной длиной воздушного зазора, равномерно по длине зазора и имеет только нормальную составляющую, неизменную по всей толщине обмоток и гармонически изменяющуюся по окружности воздушного зазора;

индукция магнитного поля в лобовых частях обмоток равна нулю;

магнитная проницаемость капсулирующего элемента, вращающейся коротко-

замкнутой обмотки и зазора равны;

индуктивное сопротивление капсулирующего элемента и вращающейся короткозамкнутой обмотки ничтожно мало;

взаимная индуктивность между капсулирующим элементом и короткозамкнутой вращающейся обмоткой отсутствует;

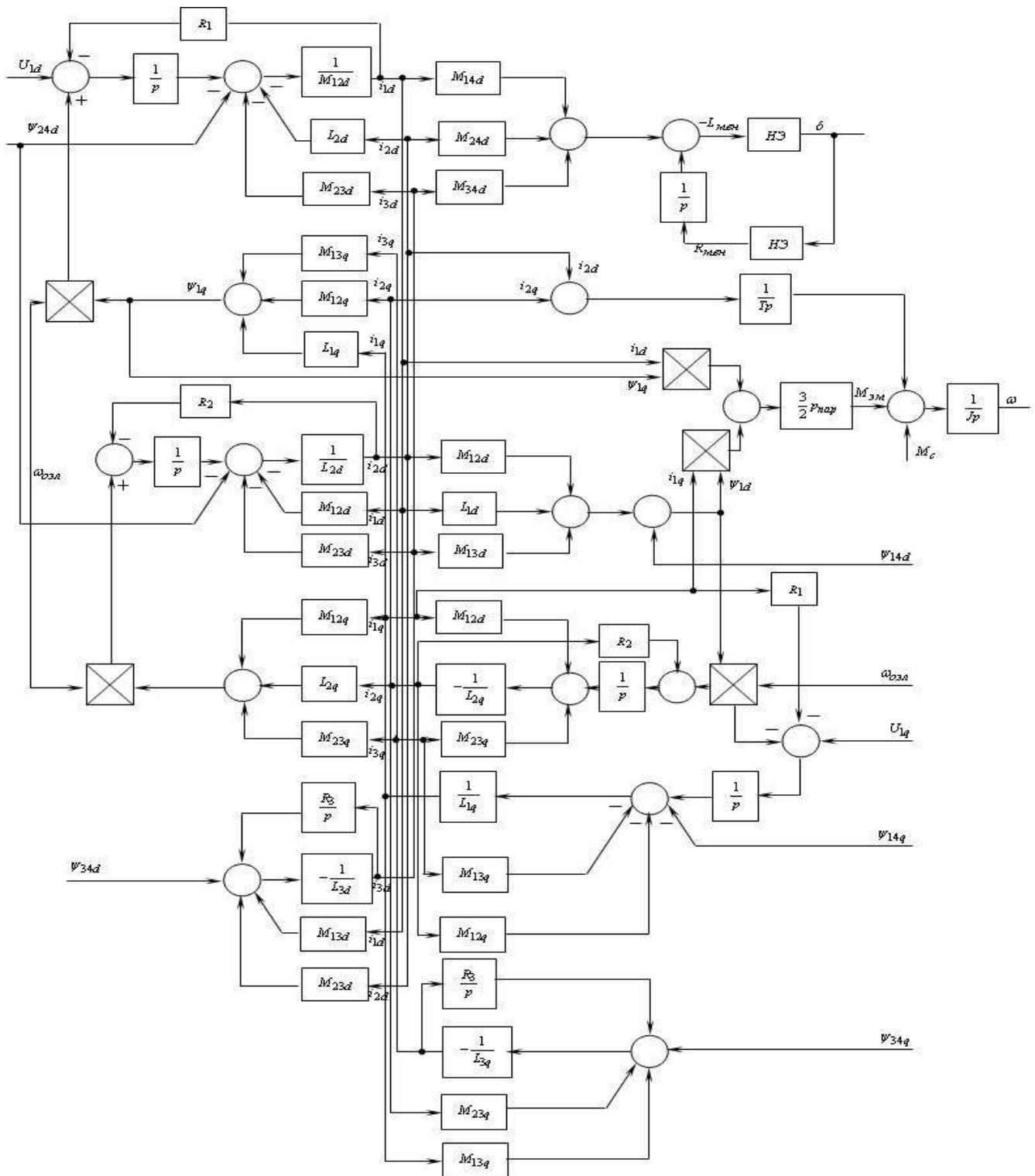
расчет взаимных индуктивностей и индуктивностей рассеяния является сложной самостоятельной задачей, решение которой связано с нахождением трехмерного распределения магнитного поля;

учитывается только основная гармоническая составляющая из всех известных и определяемых величин.

Последнее обстоятельство связано с тем, что в воздушном зазоре, наряду с основной гармонической составляющей вращающегося магнитного поля, всегда присутствуют гармонические других порядков. Это обусловлено насыщением магнитопровода, зубчатостью статора, дискретным распределением проводников вдоль длины окружности зазора и другими причинами. В реальных преобразователях форма поля в зазоре обусловлена конструктивными, эксплуатационными и технологическими причинами и является эллиптической. Однако в большинстве практических случаев, задача исследования упрощается за счет учета только основной гармонической. Таким образом, рассматривается модель обобщенного идеализированного преобразователя, характеризуемого абсолютной симметрией (электрической, магнитной, пространственной), бесконечно большой магнитной проницаемостью стальных участков и гармоническим распределением намагничивающей силы в зазоре. В процессе эксплуатации КЭМП может работать в несимметричных режимах, – например, в однофазном режиме трехфазного преобразователя, что обычно моделируется с применением метода симметричных составляющих, согласно которому токи и напряжения раскладываются на прямую, обратную и нулевую последовательности. Таким образом, при моделировании КЭМП необходимо учитывать, что в воздушном зазоре реального преобразователя присутствует бесконечный спектр гармонических составляющих магнитного поля.

Дополнительные трудности реализации теории обобщенного преобразователя для рассматриваемого ОУ связаны также с тем, что коэффициенты уравнений в математической модели в рассматриваемой системе являются нелинейными функциями определяемых величин, а сами активные и реактивные сопротивления статора и вторичных элементов, имеющих форму полого немагнитного цилиндра, точно не определены и зависят от угла поворота ротора.

Аналитическое исследование электромагнитных полей в полых роторах с учетом их формы, закономерностей распределения токов и физических свойств отдельных сред в свою очередь также требует ряда допущений для получения приемлемой инженерной методики. Математическая модель КЭМП на основе обобщенного преобразователя энергии может использоваться только для приближенных расчетов или получения предварительной информации об объекте управления. Отмеченные ограничения однозначно указывают на необходимость подходов, обеспечивающих учет неопределенности как параметров самого преобразователя, так и условий его эксплуатации. Структурная схема КЭМП изображена на рисунке (стр. 86).



Структурная схема капсулированного электромеханического преобразователя.

Анализ структурной схемы показывает, что известные уравнения (1) приближенно описывают поведение процессов преобразования энергии в ОУ, причем параметры этих уравнений не могут быть точно идентифицированы; известные уравнения, описывающие процесс, слишком сложны, но при этом могут быть интерпретированы нечетким образом для построения лингвистической модели и использованы для формирования базы знаний; причем КЭМП характеризуется большим числом входных и управляющих параметров, нелинейностью и немоделируемой динамикой ОУ.

Такая задача может быть эффективно решена синтезом системы управления КЭМП на основе нечеткой логики. Проведенный анализ результатов моделирования в пакете MATLAB Power Simulink с использованием нечеткого регулятора, реализующего любой из алгоритмов вывода, позволяет сделать вывод о повышении показателей качества переходных режимов КЭМП. Нечеткая система позволяет не только повысить эффективность работы по сравнению с традиционными системами автоматического управления, обеспечивать более высокую устойчивость к воздействию внешних возмущающих факторов, но и ввиду сложности происходящих процессов является наиболее перспективной с точки зрения управления КЭМП.

В то же время следует отметить, что хотя математическая модель (1) позволяет получить информацию о параметрах устройства как в статических, так и переходных режимах, но при этом существуют трудности, связанные с невозможностью исследовать преобразователь на неустойчивых участках его выходной характеристики, особенно на частоте питающего напряжения ниже 20 Гц. Данное обстоятельство делает в ряде случаев актуальным использование алгоритмов, позволяющих исследовать работу КЭМП во всем диапазоне его регулирования, получая полные статические характеристики преобразователя. При построении замкнутых систем векторного регулирования КЭМП с поддержанием постоянства потокосцепления вращающегося элемента возникает необходимость настройки регулятора скорости, который в силу специфики ОУ не может быть реализован стандартными методами.

Работа систем векторного управления невозможна без информации о пространственном положении вектора потокосцепления (угол  $\delta$ ), получаемой на практике от наблюдателей магнитного потока, обеспечивающих асимптотическую оценку этой переменной. Следует отметить, что достоверность работы таких наблюдателей зависит от точности определения параметров КЭМП. При работе преобразователя вследствие нагрева изменяются активные сопротивления обмоток статора, капсулирующего элемента и вторичной короткозамкнутой обмотки, и это приводит к возникновению ошибок оценивания магнитного потока, сказывается на снижении эффективности процесса преобразования энергии, может приводить к потере устойчивости. Поэтому, наряду с системами управления, построенными на основе нечетких регуляторов, определенный интерес для КЭМП представляют системы управления на основе искусственных нейронных сетей, которые благодаря присущим им универсальным свойствам аппроксимации, адаптивности и обучаемости позволяют не только устойчиво работать в условиях изменения параметров КЭМП, но и обойти математические неопределенности модели, так как качество процессов управления в сети зависит не от аналитически рассчитанных оптимальных законов, а от свойств настраиваемых многослойных нейросетей, позволяя значительно повысить быстродействие выполняемых вычислений за счет параллельной обработки.

### **Заключение**

Проведенный анализ структурной схемы капсулированного электромеханического преобразователя показал сложность реализации систем управления для рассматриваемого типа объектов. Это связано как с неточностью структуры математической модели, на основе которой строится структурная схема, так и с неопределен-



ностью параметров объекта управления. Система уравнений, описывающая КЭМП в виде обобщенной электрической машины, может быть использована только для предварительного анализа процессов и формирования базы знаний об ОУ. Синтез СУ КЭМП целесообразно производить на основе нечетких технологий с учетом априорной информации и результатов моделирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Уайт Д., Вудсон Г. Электромеханическое преобразование энергии. – М.: Энергия, 1964.
2. Шпилев М.А., Ткачук А.А. Математическая модель электротехнического перекачивающего устройства с постоянными магнитами // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № II-1(10). – С.48-55.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. – М.: АСАДЕМА, 2006.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии А.М. Шпилевым.*

*E-mail:*

*Гринфельд Григорий Михайлович – grinfelds2002@mail.ru;*

*Иванов Сергей Николаевич – isn@initkms.ru;*

*Шпилев Михаил Анатольевич – mishka120988@mail.ru.*

УДК 510:512.8

© 2012 г. **Чье Ен Ун**, д-р техн. наук  
(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск),  
**А.Б. Шеин**, канд. техн. наук  
(Чувашский государственный университет, Чебоксары)

#### МЕТОД НАХОЖДЕНИЯ КОРНЕЙ МНОГОЧЛЕНОВ. I

Для нахождения корней многочлена с заданной точностью предлагается простой и наглядный метод, основанный на получении итерационных формул, за счет выделения из многочленов простых и квадратичных множителей, с последующим сопоставлением записей многочленов с остатком, когда корни являются приближенными, и без остатка, когда значения корней являются точными. В первой части статьи излагается вывод итерационных формул с выделением из многочленов простых множителей.

**Ключевые слова:** многочлены, нахождение корней, итерационные формулы, приближенные и точные решения.

#### Введение

Во многих задачах анализа и синтеза систем управления, электрических цепей и электронных устройств требуются определение корней многочленов. Как известно, основная теорема алгебры комплексных чисел [1] гласит, что всякий многочлен с любыми числовыми коэффициентами, степень которого не меньше