

Проектирование и технология изготовления микроэлектромеханических устройств¹

АННЕНКОВ А.Н., БЕСПАЛОВ В.Я., ШИЯНОВ А.И.

Указаны направления развития теории и создания методики расчета микроэлектромеханических преобразователей (МЭМП) энергии, перечислены основные этапы технологического процесса производства статорных и роторных обмоток МЭМП на основе микролитографии.

Ключевые слова: микроэлектромеханические устройства, методика расчета и проектирования, производство обмоток

К качественно новым требованиям, предъявляемым к функциональным характеристикам приводной техники, в первую очередь следует отнести высокие скорости и точность движения, необходимые для реализации прецизионных технологий (вплоть до микро- и наноперемещений); максимальную компактность конструкции и минимизацию массогабаритных показателей (вплоть до миниатюризации в микросистемах); высокую надежность и безопасность функционирования.

Перспективные технические характеристики ряда комплексов информационной и измерительной аппаратуры в значительной степени обеспечиваются за счет совершенствования эксплуатационных возможностей входящего в них специализированного электрооборудования и мехатронных исполнительных механизмов при минимизации конструктивных параметров последних с одновременным увеличением их удельных энергетических и ресурсных свойств.

Высокоиспользуемые бесконтактные микроэлектромеханические преобразователи (МЭМП) энергии индукционного типа – синхронные микродвигатели с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, синхронные реактивные микродвигатели, малоинерционные асинхронные микродвигатели и микротахогенераторы с немагнитным ротором – могут быть интегрированы в конструкцию узлов и отдельных деталей информационной и измерительной аппаратуры различного агрегатного исполнения.

Главным препятствием создания и внедрения МЭМП является недостаточная возможность их всестороннего анализа и синтеза. Из-за этого электромагнитные, электромеханические и тепловые процессы в них представляют только качественно,

Lines in which the theory of microelectromechanical energy converters and in which a procedure for calculating such devices should be developed are indicated, and the main stages of the technological process for manufacturing the stator and rotor windings of these devices on the basis of microlithography are enlisted.

Key words: microelectromechanical devices, calculation and design procedure, manufacture of windings

затрудняя сравнительный анализ возможных вариантов их конструктивной реализации. Вместе с тем сложное нелинейное математическое описание высокоиспользуемых микроэлектромеханических устройств требует точных методик расчета.

Таким образом, в электромеханике и мехатронике высокую актуальность приобретает задача создания мехатронных модулей вращательного и линейного видов движения на основе бесконтактных микроэлектромеханических преобразователей энергии индукционного типа и прецизионной технологии производства их обмоток, а также развития теоретических исследований с целью качественного и количественного анализа параметров и характеристик этих устройств с учетом особенностей их применения.

Предлагается создать новый класс устройств – бесконтактных МЭМП индукционного типа вращательного и линейного видов движения: мехатронных модулей на базе синхронных микродвигателей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, синхронных реактивных микродвигателей, малоинерционных асинхронных микродвигателей и микротахогенераторов с немагнитным ротором, предназначенных для высокоресурсных электроприводов и функциональных узлов информационных систем, а также разработать основы методики расчета электромагнитных и тепловых процессов указанных МЭМП с использованием численных математических моделей и общей концепции проектирования и оптимизации, позволяющей решить задачу производства их обмоток на основе технологии микролитографии.

Методики, применяемые в настоящее время для проектирования электромеханических устройств, не могут быть перенесены без существенных уточнений и дополнений на МЭМП. Главным требованием при этом является применение точных чис-

¹ Продолжение публикации статей к юбилею кафедры электро-механики МЭИ (начало см. в № 11).

ленных методов расчета. Цифровое моделирование электромагнитных и тепловых процессов в бесконтактных МЭМП предлагается выполнить на основе конечно-элементного метода решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с использованием разработанных информационных моделей исследуемых объектов и современных высокопроизводительных программно-аппаратных средств. Концептуальная методика электромагнитного расчета позволяет с целью повышения устойчивости и снижения времени процесса проектирования использовать параметры моделей, полученные при решении предыдущей задачи для нахождения параметров последующей. Моделирование электромагнитных процессов в бесконтактных МЭМП методом конечных элементов с использованием современных программно-аппаратных средств (в том числе пакета конечно-элементного анализа ANSYS) практически не проводилось, поэтому возникает необходимость в проведении сравнительно большого объема расчетов, формировании общей базы данных для выбора размеров и параметров этих электрических машин и экспериментальной проверке полученных результатов на макетных образцах.

В настоящее время:

разработан программно-алгоритмический комплекс для исследования свойств МЭМП индукционного типа путем компьютерного моделирования, позволяющий использовать параметры моделей, полученных при решении предыдущей задачи, для нахождения параметров последующей, направленный на повышение точности и снижение трудоемкости расчетов [1];

получен патент, в котором определена базовая конструкция перфорированного полого ротора малоинерционного асинхронного двигателя, и разработаны аналитические модели, позволяющие определить рациональные соотношения размеров перфорированного полого ротора асинхронной микромашины [2, 3];

предложен метод учета механической мощности в конечно-элементных моделях с неперестраиваемой структурой и минимальным временем их генерации, позволяющий использовать в качестве вектора нагрузок заданные напряжения фаз обмоток и снижающий трудоемкость расчета бесконтактных МЭМП [4];

получены структуры информационных моделей объектов, для которых определены граничные условия, способ задания нагрузок и типы конечных элементов, позволяющие выполнить расчет электромагнитного поля и получить выходные характеристики МЭМП [5–7];

получены модели и методика расчета тепловых процессов [8].

Известно, что в электромеханических преобразователях малой мощности существуют проблемы, связанные с оценкой механических потерь, необходимостью уточнения распределения магнитной индукции в активной зоне и в зоне лобовых частей обмотки, точностью оценки теплового состояния и т.п. Необходимо тщательный анализ этих проблем особенно для МЭМП, что повышает требования к измерительной аппаратуре и методике проведения экспериментальных исследований. Требуется провести численный анализ зависимостей характеристик МЭМП от конструктивных размеров и режимных параметров с учетом электрических и магнитных свойств использованных материалов и получить конкретные рекомендации по проектированию МЭМП, при этом следует подчеркнуть, что опыт проектирования МЭМП в настоящее время практически отсутствует.

Главные размеры МЭМП на первом этапе определяются по среднему значению касательной (тангенциальной) силы f_T , действующей на единичную площадь активной поверхности и создающей вращательное или поступательное движение. Значение f_T зависит от свойств материалов, применяемых в МЭМП, которые и определяют электромагнитные нагрузки двигателя A и B :

$$f_T = kAB_d, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения и характера распределения индукции и тока в проводниках обмотки; B_d – максимальное значение индукции в рабочем зазоре, Тл; A – линейная нагрузка, А/м. В рассматриваемых машинах линейная нагрузка находится в пределах $A = (1, 2) \cdot 10^4$ А/м, магнитная индукция в зазоре $B_d = (0,2, 0,4)$ Тл.

Практика расчетов показала, что удельная касательная сила f_T в хорошо использованных МЭМП при номинальной нагрузке лежит в интервале $(0,2, 0,5)$ Н/см²; в кратковременном режиме работы значение f_T может быть увеличено до $(1, 2)$ Н/см². Таким образом, площадь активной поверхности МЭМП определяется из соотношения

$$S_p = F_m / f_T, \quad (2)$$

где F_m – максимальная электромагнитная сила, Н.

В основе уточненного расчета МЭМП лежат математические модели, базирующиеся на системе уравнений Максвелла:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{полн}} + \frac{\partial D}{\partial t}; \quad \text{div} \vec{B} = 0; \quad \text{rot} \vec{E} = \frac{\partial B}{\partial t} \text{div} \vec{D} = r; \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}); \vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}; \vec{j} = \text{grad}\vec{A} \quad (4)$$

$$\vec{j} = \text{grad}\vec{E}. \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) дополняются формулами, связывающими векторы \vec{B} и \vec{H} , \vec{j} и \vec{E} , \vec{D} и \vec{E} . В приведенных уравнениях: \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля, А/м; \vec{E} – вектор напряженности электрического поля, В/м; \vec{B} – вектор магнитной индукции, Тл; \vec{M} – вектор намагниченности, А/м; \vec{D} – вектор электрического смещения, Кл/м²; \vec{P} – вектор электрической поляризации, Кл/м²; r – объемная плотность заряда Кл/м³; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; $\epsilon_0 = [1/(36\pi)] \times 10^{-9}$ Ф/м – электрическая постоянная.

Для решения уравнений электромагнитного поля используются стандартные допущения:

значение ЭДС электромагнитной индукции несоизмеримо больше любых других ЭДС (контактной, Холла, Томпсона), в связи с чем последними пренебрегаем;

по сравнению с токами проводимости в проводниках токи проводимости в диэлектриках и конвекционные токи пренебрежимо малы;

токи смещения и запаздывание в распространении электромагнитных волн в пределах области поля пренебрежимо малы, что позволяет считать электромагнитное поле квазистационарным;

при рассмотрении поля в неферромагнитной среде относительная магнитная проницаемость среды считается равной единице;

при исследовании магнитных систем принимается, что электромагнитное поле не изменяется во времени, а также отсутствует перемещение заряженных частиц; в этом случае электрические и магнитные явления становятся независимыми друг от друга.

Систему уравнений Максвелла можно представить в виде:

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j}; \text{div}\vec{B} = 0; \vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}); \quad (6)$$

$$\text{rot}\vec{E} = 0; \text{div}\vec{D} = r; \vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P}. \quad (7)$$

Электромагнитное поле, создаваемое постоянными токами, называют стационарным. Большинство задач, связанных с рассмотрением электромагнитного поля, можно решить, применив теорию стационарного электромагнитного поля, т.е. оперировать заранее известными токами (распределен-

ными в пространстве токов), постоянными во времени.

Для упрощения решения задачи вводятся вспомогательные функции – векторный магнитный потенциал \vec{A} и скалярный магнитный потенциал j_m , определяемые из уравнений:

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A}; \quad (8)$$

$$\vec{H} = \text{grad}j. \quad (9)$$

В дальнейшем достаточно рассматривать векторный магнитный потенциал \vec{A} , определяемый из условия: вышеприведенные уравнения удовлетворены во всем пространстве, где существует магнитное поле.

Для однородной среды

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j}. \quad (10)$$

Выражение (10) можно представить в виде

$$\mu_0 \text{rot}\vec{H} = \text{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{j}. \quad (11)$$

На основании (7) получим

$$\text{rot}\text{rot}\vec{A} = \mu_0 \vec{j}, \quad (12)$$

однако

$$\text{rot}\text{rot}\vec{A} = \text{grad}\text{div}\vec{A} - \text{div}\text{grad}\vec{A}. \quad (13)$$

Для случая стационарного магнитного поля $\text{div}\vec{A} = 0$, тогда

$$\text{rot}\text{rot}\vec{A} = -\text{div}\text{grad}\vec{A} = \mu_0 \vec{j}. \quad (14)$$

В декартовой системе координат (13) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}^2 A_z &= \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = -\mu_0 J_z; \\ \tilde{\Delta}^2 A_x &= \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} = -\mu_0 J_x; \\ \tilde{\Delta}^2 A_y &= \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} = -\mu_0 J_y, \end{aligned} \quad (15)$$

где $\tilde{\Delta}^2$ – оператор Лапласа; A_x, A_y, A_z – проекции вектора \vec{j} на оси координат.

Уравнения (15) являются системой уравнений Пуассона. Для ее однозначного решения необходимо задать граничные условия. При этом задача решается в варианте осесимметричного двухмерного поля. На указанной границе задается условие $A = 0$. Задача решается методом конечных элементов.

Через известное распределение векторного магнитного потенциала $A(x, y)$ могут быть определены составляющие вектора магнитной индукции:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = \frac{\partial A_z}{\partial x}. \quad (16)$$

Для определения магнитного потока через любую поверхность следует определить циркуляцию вектора \vec{A} по контуру, охватывающему эту поверхность,

$$F = \oint_L \vec{A} d\vec{e}. \quad (17)$$

Для реализации данной математической модели необходимо предварительно определить основные размеры магнитной системы, которые в дальнейшем корректируются на основе полученных результатов.

Таким образом, методом конечных элементов с помощью специального программного обеспечения по (15) проводят численный расчет распределения векторных магнитных потенциалов A , который позволяет по (16), (17) рассчитать составляющие вектора магнитной индукции B_x , B_y и магнитные потоки.

На рубеже настоящего столетия было доказано, что миниатюризация и компьютерное моделирование электрических, магнитных, механических и других свойств материалов с последующим синтезом объемных изделий – ведущее направление развития современных технологий. Речь идет о технологиях, реализуемых с использованием специального оборудования. Это физические технологии взрыва проводников и плазменного синтеза, технологии восстановления тонких пленок и молекулярного наслаивания, которые являются химическими по своему происхождению. Весьма распространена технология фотолитографии, имеющая инженерное происхождение и практически являющаяся расширенной технологией изготовления печатных плат.

Технологический процесс изготовления обмоток МЭМП может быть представлен следующей цепочкой основных операций:

1. Очистка подложки (очистка растворителями: трехкомпонентные растворы с промывкой водой);
2. Сушка подложки на центрифуге;
3. Термообработка (отжиг) в парах промотора адгезии (например, гексаметилдисилозана) и охлаждение;
4. Напыление электропроводящего слоя (пленки) на подложку (материал обмотки МЭМП выбирается с учетом адгезионных свойств пленки, подложки и возможностей оборудования для напыления);

5. Термообработка в парах промотора адгезии;
6. Нанесение фоторезиста;
7. Сушка;
8. Экспонирование обмотки (маски, шаблона);
9. Проявление;
10. Сушка и термостабилизация;
11. Травление алюминия (состав комплекта оборудования зависит от проектной нормы – определяется заданными размерами отдельных проводников обмотки и расстояниями между ними);
12. Промывка, сушка;
13. Удаление фоторезиста;
14. Промывка, сушка;
15. Пассивирование алюминия (методом центрифугирования);
16. Скрабирование подложки (резка поликорových или стеклянных пластин на отдельные части, представляющие собой готовые изделия – обмотки или элементы обмоток МЭМП);
17. Очистка изделий;
18. Разварка выводов обмоток.

Для контроля параметров выпускаемых изделий применяются микроскопы высокого разрешения.

Номенклатура применяемых материалов диктуется конструктивными особенностями изделий и включает ряд вариантов типоразмеров комплектов постоянных магнитов, необходимых для изготовления магнитных систем МЭМП на основе редкоземельных магнитов $Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$, Sm_2Co_7 , а также комплектов подложки из ряда материалов (поликор, сетал, стекло и др.), необходимых для изготовления статорных и роторных обмоток МЭМП, и расходных материалов (фоторезисты, растворы для очистки подложек от механических, неорганических и органических загрязнений, материалы для напыления активного слоя, из которого формируется обмотка с заданной структурой и проектными размерами).

Необходимое технологическое оборудование для производства обмоток МЭМП, безусловно, зависит от закладываемых проектных норм изделий. Так, при технологических нормах до 100 нм, соответствующих требованиям РОСНАНО, список оборудования будет включать следующие позиции:

1. Установка для измерения клина прогиба и прецизионного измерения линейных размеров (разбраковка подложек, контроль неплоскостности геометрии подложек) – поставщик ОАО «Остек», Москва [10];
2. Установка электронно-лучевого напыления металлов (напыление активного слоя статорных и роторных обмоток) – производитель LND «Evatec» [11];

3. Комплекс водоподготовки (серийное производство в РФ ряда предприятий электронного машиностроения);

4. Установка для нанесения фоторезиста (разработка КБ микро- и нанотехнологического оборудования НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий», Воронеж) [9];

5. Установка для проявления фоторезиста – тот же разработчик [9];

6. Спектральный эллипсометр, оптический УФ-микроскоп высокого разрешения, электронный микроскоп (контроль толщины пленок алюминия, фоторезиста и линейных размеров элементов; измерение конечной толщины пленок и линейных размеров элементов для контроля технологических режимов) – поставщик ОАО «Остек», Москва [10];

7. Установка совмещения и экспонирования (создание скрытого изображения маски обмотки в резистивной пленке) – производитель LTD «SUSS VicroTec» [12];

8. Установка плазмохимического травления алюминия (перенос изображения резистивной маски в пленку металла) – производитель ДЕВ «Corial and Evatec» [11, 13];

9. Установка лазерного скрайбирования (резка подложки) – поставщик ОАО «Остек», Москва [10];

10. Установка лазерной сварки выводов (разварка выводов, корпусирование) – поставщик ОАО «Остек», Москва [10].

В случае технологических норм до 50 мкм список оборудования и содержание ряда технологических операций существенно изменяются в сторону снижения требований к техпроцессу. При этом фотолитографическое обеспечение включает следующее оборудование:

1. Установка безмаскового экспонирования – производитель LTD «Raith SmbH» [14];

2. Установка нанесения фоторезиста производства КБ микро- и нанотехнологического оборудования НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий», Воронеж [9];

3. Установка проявления фоторезиста производства КБ микро- и нанотехнологического оборудования НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий», Воронеж [9];

Оборудование для химического обеспечения включает следующие позиции:

4. Установка очистки от органических загрязнителей;

5. Термообработка (отжиг) в парах промотора адгезии (термоудар и термостабилизация);

6. Установка травления алюминия;

7. Установка для сушки методом центрифугирования (соответствующий модуль).

Кроме того, необходимо следующее оборудование.

8. Комплекс водоподготовки производительностью от 0,5 м³/ч (минимальная производительность серийно выпускаемого оборудования);

9. Установка напыления алюминия;

10. Установка лазерного скрайбирования (резка подложки) – поставщик ОАО «Остек», Москва [10];

11. Установка лазерной сварки выводов (разварка выводов, корпусирование) – поставщик ОАО «Остек», Москва [10].

Следует подчеркнуть, что затраты на изготовление и приобретение технологического оборудования по двум рассмотренным вариантам отличаются на порядок.

Технологические аспекты изготовления микро-рельефа обмоток МЭМП предлагается проработать на базе технологии микролитографии с использованием ряда технологических уставок (роботизированной уставки нанесения фоторезиста CPF-150A; полуавтоматической уставки проявления UNF-150T, спроектированной в рамках госконтракта; малогабаритной уставки UNF-60L), разработанных в НОУ ВПО «Международный институт компьютерных технологий» [9].

В настоящее время геометрия микро-рельефа обмоток статора и ротора синхронных микродвигателей с возбуждением от редкоземельных постоянных магнитов, синхронных реактивных двигателей, малоинерционных асинхронных микродвигателей и микротахогенераторов с неферромагнитным ротором практически не исследована, отсутствуют зависимости предельных плотностей токов в элементах обмотки от используемого материала, расстояний между отдельными проводниками от напряжений питания, требуемой механической прочности витков, теплофизических и магнитоэлектрических свойств подложки и т.д.

Основные требования к материалам обмотки и массива подложки и их физическим свойствам, допускам на технологический разброс параметров, соотношению между размерами микро-рельефа обмотки, химическому составу реактивов, мощности и временным параметрам формирующего излучения и пр. ввиду сложности процесса микролитографии и жесткой связи с характеристиками основного технологического оборудования могут быть определены преимущественно опытным путем и в настоящее время отсутствуют. Кроме того, требуется обеспечить производство обмоток статора и ротора МЭМП необходимым комплектом фо-

тошаблонов, оптимизированных в направлении повышения технико-эксплуатационных параметров МЭМП с учетом технологии их изготовления.

Можно считать, что в настоящее время исследования в области создания микро- и наноэлектромеханических устройств находятся в начальной стадии. Вместе с тем существующая тенденция минимизации конструктивных параметров мехатронных исполнительных механизмов с одновременным увеличением их энергоэффективности и ресурса работы свидетельствует о несомненном повышении роли прецизионных мехатронных устройств в развитии современного оборудования. Это позволяет утверждать, что потребность в мехатронных модулях на основе МЭМП будет увеличиваться быстрыми темпами и позволит обеспечить отечественные предприятия, выпускающие конкурентоспособную инновационную продукцию, высокоэнергоэффективными мехатронными модулями и МЭМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анненков А.Н., Сизиков С.В., Шиянов А.И. Асинхронные двигатели с токопроводящим слоем материала ротора. — Минск: УП «Ризондис», 2004.
2. Патент 2232460 (РФ). Асинхронный двигатель с полым ротором/А.Н. Анненков, А.И. Шиянов. — БИ, 2004, № 17.
3. Анненков А.Н. Асинхронные исполнительные микродвигатели с повышенными энергетическими показателями. — Мехатроника, автоматика, управление, 2005, № 1.
4. Анненков А.Н. Моделирование электромагнитных процессов в асинхронных двигателях с токопроводящим слоем ротора методом конечных элементов. — Системы управления и информационные технологии, 2005, № 2 (19).
5. Анненков А.Н., Кобзистый С.Ю. Методика электромагнитного расчета цилиндрических линейных синхронных двигателей. — Изв. вузов. Электромеханика, 2008, № 3.
6. Анненков А.Н., Иванов М.А., Кобзистый С.Ю. Численное моделирование синхронного двигателя с возбуждением от высококоэрцитивных магнитов. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2009, № 2.
7. Анненков А.Н., Иванов М.А., Прибылова Н.В. Совершенствование систем возбуждения бесконтактных двигателей. — Вестник ВГАУ, 2011, № 4.
8. Анненков А.Н., Акимов С.С. Расчет температурного поля бесконтактного двигателя на основе теории цепи. — Электротехнические комплексы и системы управления, 2010, № 4.
9. <http://www.iict.ru/>
10. <http://www.ostec-micro.ru/>
11. <http://www.evatecnet.com/>
12. <http://www.suss.com/>
13. <http://www.corial.net>
14. <http://www.raith.com/>

А в т о р ы : Анненков Андрей Николаевич окончил Воронежский политехнический институт в 1985 г. Докторскую диссертацию «Развитие научных основ моделирования и анализа электромагнитных процессов для систем проектирования асинхронных двигателей с токопроводящим слоем ротора» защитил в Воронежском государственном техническом университете в 2005 г. Проректор по научной работе Международного института компьютерных технологий (МИКТ), Воронеж.

Беспалов Виктор Яковлевич окончил электромеханический факультет МЭИ в 1960 г. Докторскую диссертацию «Асинхронные машины для динамических режимов работы» защитил в МЭИ в 1992 г. Профессор кафедры электромеханики «НИУ «МЭИ».

Шиянов Анатолий Иванович окончил Челябинский политехнический институт в 1968 г. Докторскую диссертацию «Комплекс оборудования для перегрузки ядерного топлива на энергоблоках ВВЭР» защитил в МЭИ в 1987 г. Ректор МИКТ.

* * *

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов России и зарубежных фирм!

Журнал «Электричество» предоставляет свои страницы для

- РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматике
- ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах
- ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира.

Напоминаем наш адрес: 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Тел./факс (7-495)362-7485