

А.А. Ставинский, д-р техн. наук,  
И.А. Тищенко, канд. техн. наук,  
Н.И. Зеленый

## **ПЕРСПЕКТИВЫ И ОСОБЕННОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

*Показано, що основними сучасними напрямками подальшого розвитку індукційних електро-механічних і статичних перетворювачів є пошук і розробка нетрадиційних рішень активної і конструктивної частин, а також структурні перетворення електромагнітних систем.*

*Показано, что основными современными направлениями дальнейшего развития индукционных электромеханических и статических преобразователей является поиск и разработка нетрадиционных решений активной и конструктивной частей, а также структурные преобразования электромагнитных систем.*

*It is shown that basic modern directions of further development of induction electromechanics and static transformers is a search and development of untraditional decisions of active and structural part, and also structural transformations of the electromagnetics systems.*

Наименее материалоемкими и трудоемкими в производстве, а также наиболее надежными преобразователями энергии, созданными человеком, являются индукционные электрические машины - короткозамкнутые асинхронные двигатели (АД) и трансформаторы.

Необходимость усовершенствования основных видов продукции электротехнической промышленности – индукционных электромеханических и статических преобразователей (ИЭМСП) в Украине с каждым годом становится все более актуальной [5, 15]. Это обусловлено действием факторов морального и технологического износа основного парка асинхронных электроприводов, а также планируемым вводом новых и техническим переоснащением существующих трансформаторных подстанций. Согласно [5] потери электроэнергии в распределительных сетях Украины составляют до 20 % мощности отпущенной генерирующими станциями. Значительную долю этой части составляют потери в трансформаторах габаритов I-II классов напряжения 6–35 кВ. Не менее важными и актуальными являются задачи дальнейшего снижения удельной и технологической материалоемкости

производства ИЭМСП.

Однако решение задач достижения экономии при электромеханическом и электромагнитном преобразовании энергии, а также экономии материальных и трудовых ресурсов при изготовлении ИЭМСП требует все больших усилий и значительных материальных затрат на выполнение исследований и новых разработок.

«Классические» способы решения задач повышения технического уровня ИЭМСП – использование усовершенствованных электротехнических материалов и оптимизационных расчетов, а также повышение равномерности распределения температуры в объеме активной части и усовершенствование систем форсированного охлаждения [7, 11 – 14].

Весьма актуальным является перевод производства магнитопроводов на аморфные, моно-, микро- и нанокристаллические электротехнические стали (ЭТС) [8], решение задач утилизации отработавших ресурсов электрических машин с учетом экологических требований. Однако возможности дальнейшего снижения материалоемкости и повышения технического уровня в целом ИЭМСП путем использования улучшенных материалов, автоматизированного проектного синтеза и форсированного охлаждения в рамках традиционных конструкций асин-

хронных АД «классического» исполнения и трансформаторов с планарными магнитопроводами практически исчерпаны [6,7,11–13,16]. Необходимы нетрадиционные подходы к усовершенствованию ИЭМСП на основе системного подхода и структурных преобразований электромагнитных систем.

На рис. 1 представлена активно-конструктивная часть одной из разработок начала XXI века Новокаховского отделения УкрНИИВЭ – специальный АД с залитыми электроизоляционным компаундом лобовыми частями обмотки статора. Двигатель отличается повышенной надежностью капсулированной обмотки статора. Для повышения энергетических показателей несущественно изменена конструкция ротора и модернизирована система охлаждения [14]. Однако концептуально активно-конструктивная часть, а также основные показатели данного АД незначительно отличаются от предшествующих аналогов.

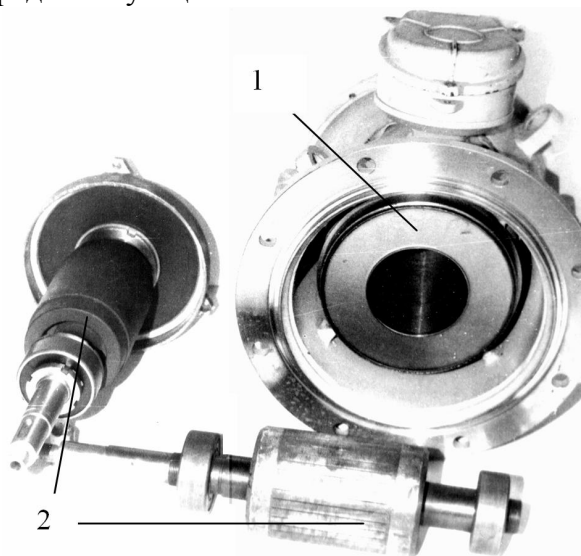


Рис. 1. Конструктивная схема асинхронного двигателя с капсулированной обмоткой статора, мощностью 11 кВт, частотой вращения 1500 об/мин:  
1 – статор; 2 – варианты короткозамкнутого ротора

Согласно [6,7,11–14,16] в последней четверти прошедшего столетия из традиционных (классических) конструкций активной части и материалов производства ИЭМСП было «выжато» все. Целый ряд «новых» серий АД, созданных в начале XXI века, практически не имеют преимуществ перед их

аналогами конца предыдущего века [7]. Также, согласно [7], новые технические решения могут быть найдены с использованием нетрадиционных для ИЭМСП теории систем и теории симметрии.

Некоторые результаты разработок нетрадиционных технических решений ИЭМСП [1-3,11-13] с использованием концепций системного подхода, пространственных симметрии и структур электромагнитных систем (ЭМС) представлены на рисунках 2– 5.

Примером системного подхода при разработке вращающихся электрических машин является обеспечение многофункциональности магнитопровода статора или элементов обмотки ротора АД.

На рис. 2 показаны конструктивная схема закрытого обдуваемого АД и особенности магнитопровода с пространственной многоплоскостной структурой [1], обеспечивающей снижение отходов ЭТС при производстве и другие преимущества. В указанном бескорпусном АД (рис.2,а) конструктивная часть содержит несущие опорные элементы, а магнитопровод (рис. 2, б) статора пространственную зону из отогнутых в осевом направлении и наложенных участков, а также зону из плоских участков элементарных слоев ЭТС (рис.2,в). Пространственная зона обеспечивает увеличение в 1,5–2 раза площади внешней поверхности охлаждения статора и выполняет функции жесткого корпуса, опирающегося на конструкционные элементы.

Рис. 3 характеризует конструктивную схему обращенного АД с двумя симметричными секциями и конусно-плоскостной структурой слоев ЭТС магнитопровода ротора [2].

В пределах мощности и полюсности, позволяющих использовать технологию заливки пазов, АД с двухсекционным ротором схемы и исполнения (рис. 3) обеспечивает снижение материалоемкости и трудоемкости производства, минимум узлов и деталей, повышение равномерности зазора и надежности. На основе смещения стержней и "шевронного" скоса пазов в смежных секциях обеспечивается существенное снижение вибрации и шума такого АД.

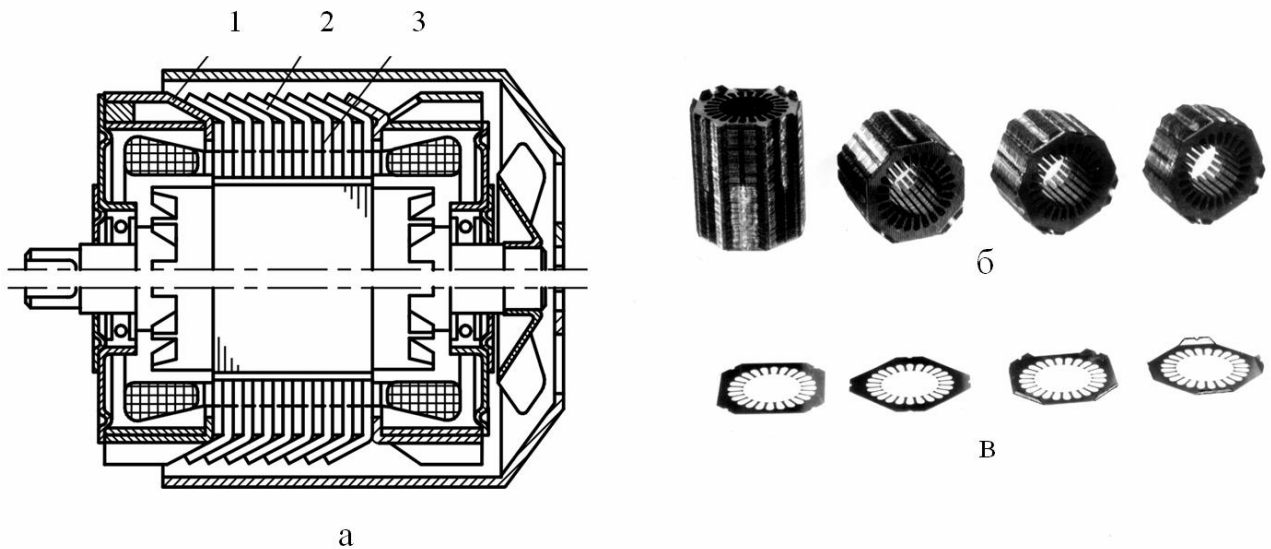


Рис. 2. Конструктивная схема (а) и особенности многоплоскостного магнитопровода (б-в) асинхронного двигателя: 1 – опорный элемент; 2 – опорный участок ярма; 3 – зубцово-пазовый слой с плоскими участками слоев стали ярма статора

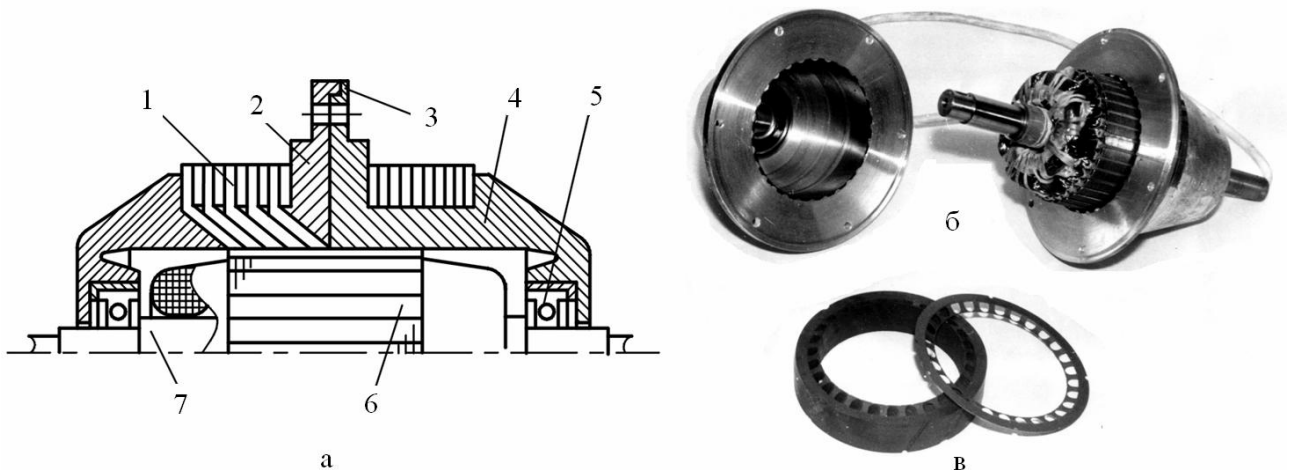


Рис. 3. Конструктивная схема (а) обращенного асинхронного двигателя со снятым полуротором (б), пакет и пластина (в) магнитопровода полуротора: 1 – магнитопровод полуротора; 2 – промежуточное короткозамыкающее кольцо; 3 – фланец крепления механизма; 4 – подшипниковый щит; 5 – подшипник; 6 – статор; 7 – ось

В пределах мощности и полюсности, позволяющих использовать технологию заливки пазов, АД с двухсекционным ротором схемы и исполнения рис.3 обеспечивает снижение материалоемкости и трудоемкости производства, минимум узлов и деталей, повышение равномерности зазора и надежности. На основе смещения стержней и "шевронного" скоса пазов в смежных секциях обеспечивается существенное снижение вибрации и шума такого АД.

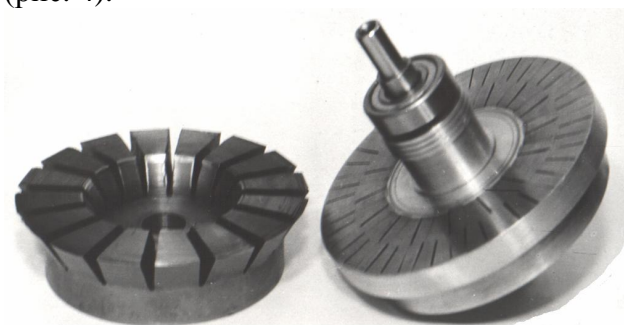
Указанные преимущества достигаются заливкой пазов каждой секции магнитопро-

вода ротора одновременно с отливкой промежуточного короткозамыкающего кольца с выступами крепления механизма и корпуса (щита) установки подшипников. Статор установлен на неподвижной оси.

Фотографии, представленные на рис. 4 и рис.5, характеризуют особенности аксиальных конструктивных схем ЭМС индукционных электромеханического и статического преобразователей.

Особенностью, отличающей аксиальные (торцевые) АД, является повышенный момент инерции ротора и, как следствие, по-

вышенные длительность переходных процессов и гироскопическая нагрузка в приводе механизмов подвижных объектов. Снижение массы и материалоемкости, момента инерции и улучшение показателей в целом торцевых АД относительно их аналогов традиционных структур достигается на основе пространственной конусно-цилиндрической структуры слоев ЭТС магнитопровода (рис. 4).



а б

Рис. 4. Магнитопровод ротора (а) и короткозамкнутый ротор (б) торцевого двухполюсного двигателя мощностью 1,5 кВт (380 В, 50 Гц)



Рис. 5. Трехфазный компактный трансформатор с симметричным пространственным магнитопроводом

Важным современным санитарным, техническим и специальным требованием, предъявляемым к электрооборудованию, является электромагнитная совместимость, в частности уровень внешнего магнитного поля. Особенность симметричных аксиальных структур электромагнитных систем вращающихся «торцевых» и статических преобразователей [10] – теоретический минимум (ноль) результирующего «магнитного момента». Поэтому усовершенствование и раз-

работку, например трехфазного трансформатора [13], одновременно удовлетворяющего условиям максимальной компактности и минимума внешнего магнитного поля без устройств магнитной компенсации, можно обеспечить использованием только аксиальных пространственных симметричных ЭМС (рис.5).

Другим возможным примером системного подхода и использования принципа пространственной симметрии является усовершенствование оборудования охлаждения с принудительной циркуляцией жидкого или газового хладагента в баке и охлаждающих каналах ЭМС индукционного статического устройства.

Традиционные планарные ЭМС трехфазных трансформаторов отличаются существенной неравномерностью распределения теплового поля и худшими условиями охлаждения катушек обмотки на среднем стержне. Интенсификация охлаждения мощных трансформаторов осуществляется принудительной циркуляцией трансформаторного масла с установкой в маслопровод каждого радиатора погружного электронасоса. При этом планарная структура ЭМС обуславливает увеличение числа радиаторов со снижением единичной мощности и производительности электронасосов и снижением энергетической эффективности электропривода системы охлаждения и трансформаторного агрегата в целом.

Аксиальная пространственная ЭМС с соединением стержней треугольником (рис.6) позволяет создать симметричную в аксиальном и радиальном направлениях структуру активной и конструктивной части трехфазного трансформатора или реактора. Такая структура отличается наличием свободного пространства в зонах внутренних контуров ярем (рис. 6,а,б). Указанные особенности позволяют интегрировать с целью энергоресурсосбережения комплектное оборудование принудительной циркуляции трансформаторного масла в единый погружной электронасос с трубопроводами и масляными коллекторами из прессующих элементов магнитопровода [9]. Прессующие элементы и коллектор могут быть выполнены из швеллеров (рис. 6, в) которые состыкованы на оси ЭМС

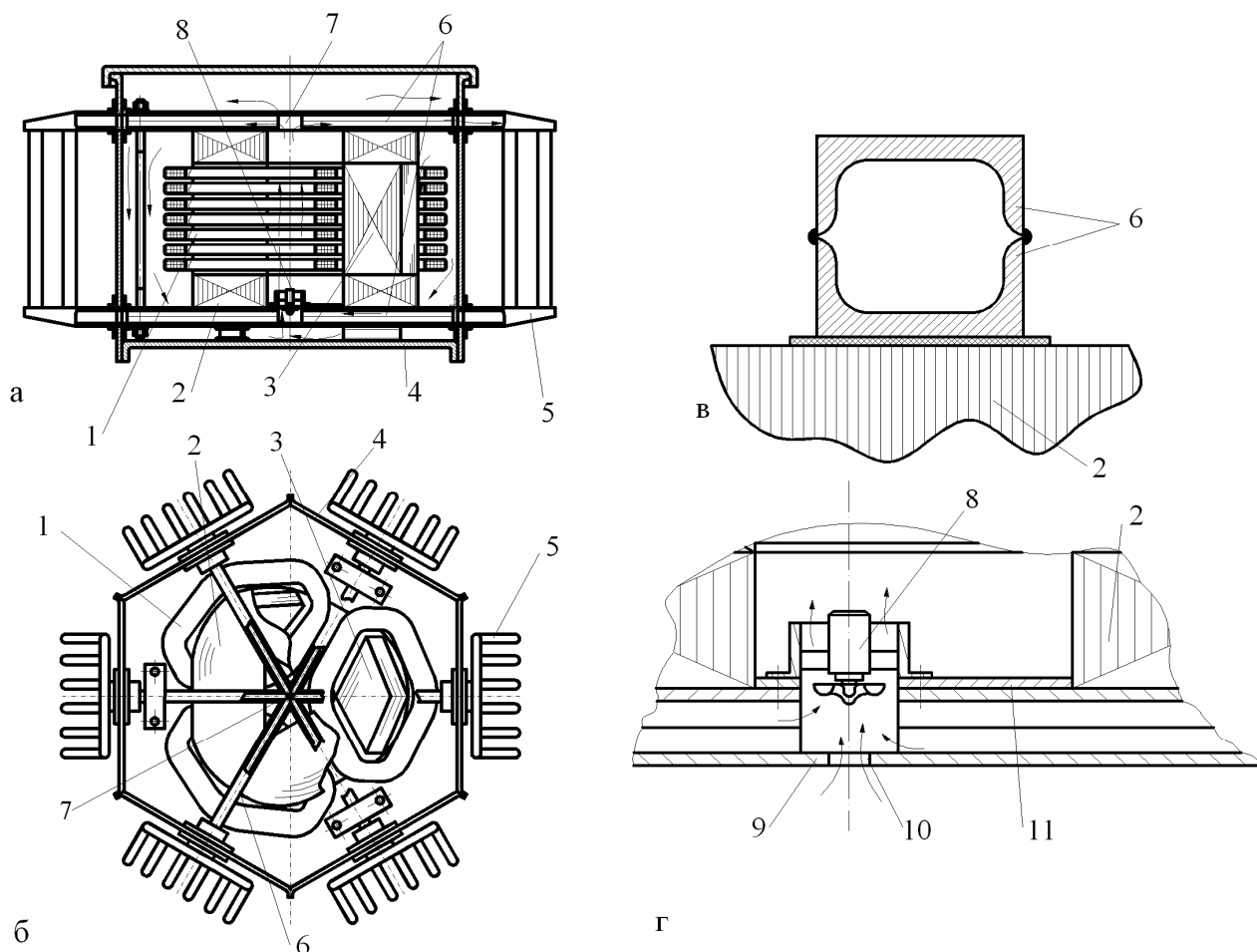


Рис. 6. Конструктивная схема трехфазного трансформатора с аксиальной пространственной электромагнитной системой и оборудованием принудительного охлаждения:  
 1 – обмотка; 2 – ярмо; 3 – стержень; 4 – бак; 5 – радиатор; 6 – ярменная балка – хладагентопровод; 7 – верхний коллектор хладагента; 8 – электронасос;  
 9 – нижний коллектор хладагента; 10 – отверстие входа хладагента; 11 – перегородка

(рис.6, б) скошенными концами. С целью интенсификации внешней и внутренней циркуляции масла, согласно [9], электронасос встроен в полость внутреннего контура нижнего ярма, нижний коллектор содержит центральное отверстие входа масла, а между электронасосом и ярмом установлена перегородка (рис. 6, г).

### ВЫВОДЫ

1. Решение задач энергоресурсосбережения в процессе непрерывного увеличения производства и распределения электроэнергии, а также расширения структурного и видового состава электромеханических устройств требует значительных усилий электромехаников и инновационной поддержки со стороны государства.

2. Дальнейшее существенное снижение материалоемкости и повышение энергетических показателей в рамках сложившихся в течение столетия конструктивных исполнений вращательных и статических электрических машин традиционными способами не представляется возможным.

3. Основным направлением дальнейшего развития являются системный подход, поиск и разработка нетрадиционных решений активной и конструктивной части ИЭМСП, структурные преобразования и структурная оптимизация их электромагнитных систем.

### Список использованной литературы

1. А.с. 1339749 СССР, МКИ<sup>4</sup>Н02К1/06. Магнитопровод электрической машины / А.А. Ставинский. – № 3922315 /24 – 07; за-

явл. 04.07.85; опубл. 23.09.87. Бюл. № 35.

2. А.с. 1693685 СССР, МКИ<sup>5</sup>H02K1/06. Магнитопровод электрической машины / А.А. Ставинский. – № 4647796 / 07; заявл. 24.11.88; опубл. 23.11.91. Бюл. № 43.

3. А.с. 936225 СССР, МКИ<sup>3</sup>H02K1/06. Электрическая торцевая машина / А.А. Ставинский. – №2930999/ 24-07; опубл. 15.06.82, Бюл. № 22.

4. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов /С.Б. Васютинский – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.

5. Інноваційні пріоритети паливно-енергетичного комплексу України. – К.: Українські енциклопедичні знання. 2005. – 512 с.

6. Казанский В.М. Кризис и перспективы развития малых двигателей / В.М. Казанский // Электричество. – 1996. – № 8. – С. 37 – 43.

7. Конохов Н.Н. Структурный анализ и принцип симметрии при совершенствовании конструкции электрических машин / Н.Н. Конохов // Электротехника і електромеханіка. – 2007. – № 7. – С. 36 – 38.

8. Поведение магнитных свойств аморфных и монокристаллических сплавов базовой системы *FE-SI-B*, подвергнутых  $\gamma$ -облучению / [В.Б. Неймаш, В.Ю. Поварчук, Л.Е. Тараненко и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2002. – № 6. – С. 59 – 64.

9. Пат. 38596 Україна, МПК (2006) H01F27/10. Статичний індуктивний пристрій / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, І.О. Тищенко. – № 200809424; заявл. 18.07.08; опубл. 12.01.09, Бюл. № 1.

10. Розов В.Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения / В.Ю. Розов. – К.: 1995. – 42 с. – (Препр. / НАН Украины. Ин-т Электродинамики, № 772).

11. Ставинский А. А. Проблема и направления дальнейшей эволюции устройств электромеханики /А.А.Ставинский // Электротехніка і електромеханіка. – 2004. – № 1. – С. 57– 61.

12. Ставинский А.А. Проблема и нетрадиционные технические решения улучшения виброакустических характеристик асинхронных двигателей / А.А. Ставинский // Электротехніка і електромеханіка. – 2004. – №4. – С. 81 – 85.

13. Ставинский А.А. Особенности назначения и использования специальных электрических машин / А.А. Ставинский // Электротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 1. – С. 44 – 48.

14. Тищенко И.А., Зеленый Н.И. Повышение эффективности охлаждения асинхронных короткозамкнутых двигателей степени защиты IP 54 / И.А. Тищенко, Н.И. Зеленый // Электромаш. та електрообладнання. – 2004. – № 63. – С. 50 – 53.

15. Шидловський А.К., Федоренко Г.М. Макроекономічні та електротехнічні тренди в електроенергетиці України, 1990 – 2000/ А.К. Шидловський, Г.М. Федоренко Г.М. // Техн. електродинаміка. – Ч.1.– К.: – 2002. – С. 3 – 12.

16.Volkrodt W. Neue wege im Electromashinenbau / W.Volkrodt // Electro-Job. – 1985. – P. 29 -38.

Получено 07.07.2010



Ставинский  
Андрей Андреевич, д-р  
техн. наук,  
зав.каф."Судовые электротенерг.системы" Нац.  
ун-та кораблестр.  
им.адм.Макарова,  
т. (0512)36-02-27.



Тищенко  
Иван Александрович,  
канд.техн.наук, зав.каф.  
"Эл. машины и аппараты"  
Новокаховск. поли-  
техн.ин-та,  
т.(05549)7-23-60.



Зеленый Николай  
Иванович, ст.преп.каф.  
"Эл.машины и аппараты"  
Новокаховск.политехн.  
ин-та  
т. (05549)7-23-60.