

УДК 621.313.29-83

А. Ф. Винаков, В. Д. Косенков, А. В. Яковлев, кандидаты техн. наук,
Д. А. Ивлев

НИЗКООБОРОТНАЯ МАШИНА ПОСТОЯННОГО ТОКА БИИНДУКТОРНОГО ТИПА

Аннотация. Рассматривается конструкция низкоскоростной машины постоянного тока бииндукторного типа, обеспечивающая благодаря новым конструктивным решениям значительное улучшение ряда удельных показателей и снижение затрат электрической энергии в статических и динамических режимах работы электропривода.

Ключевые слова: безредукторный электропривод, коэффициент полезного действия, ротор, статор, обмотка якоря, секция, коллектор, масса, электрические потери, электромагнитный момент, магнитная система

**O. Vynakov, PhD., V. Kosenkov, PhD., O. Jakovlev, PhD.,
D. Ivlev**

LOW-SPEED DIRECT-CURRENT MOTOR BIINDUCTOR-TYPE

Abstract. Considered is the construction of low-speed direct-current motor biinductor-type and, owing to the new design, providing a sufficient improvement of the number of unit indexes and the decreasing of the electrical power losses in static and dynamic moods of electrical drive.

Keywords: direct-drive, efficiency, rotor, stator, armature winding, section, collector, mass, electric losses, air gap torque, magnetic system

О. Ф. Винаков, В. Д. Косенков, О. В. Яковлев, кандидаты техн. наук,
Д. А. Ивлев

НИЗКООБОРТОВА МАШИНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ БІІНДУКТОРНОГО ТИПУ

Анотація. Розглядається конструкція машини постійного струму з малою номінальною швидкістю бііндукторного типу, яка завдяки новим конструктивним рішенням забезпечує значне покращення низки питомих показників і зменшення втрат електричної енергії в статичних та динамічних режимах роботи електропривода.

Ключові слова: безредукторний електропривод, коефіцієнт корисної дії, ротор, статор, обмотка якоря, секція, колектор, маса, електричні втрати, електромагнітний момент, магнітна система

Введение. К достоинствам привода постоянного тока традиционно относят возможность динамических режимов работы с постоянным моментом вращения, жесткими требованиями по перегрузочной способности в широком диапазоне скоростей. До середины 90-х годов прошлого века парк регулируемых приводов преимущественно состоял из приводов постоянного тока. Однако появление новых силовых электронных компонентов (SCR, IGCT, IGBT, MOSFET) привело к тому, что надежный и дешевый асинхронный двигатель вместе с относительно дешевым преобразователем частоты (инвертором) начал активно вытеснять регулируемый привод постоянного тока, сократив долю его применения на 10 % [1].

Во многом такое положение обусловлено дороговизной и высокой технологической сложностью классической машины постоянного тока (МПТ). При рассмотрении безредукторного привода постоянного тока к вышеперечисленным недостаткам следует добавить относительно малую величину КПД такого привода (60 – 70% для наиболее востребованного на рынке диапазона мощностей 7,5 – 75 кВт).

Цель работы – создание дешевой и технологичной низкооборотной машины постоянного тока с высокой перегрузочной способностью и КПД.

Материалы исследований. В Одесском национальном политехническом университете более 40 лет

ведутся работы по разработке и исследованию низкооборотных электрических машин постоянного тока индукторного типа. Большой вклад в развитие этого направления внесли ученые Косенков В. Д., Ивлев А. Д., Артеменко В. И., Рымша В. В. За эти годы был разработан ряд конструкций линейного и вращательного типов [2 – 6].

В частности, разработана конструкция низкооборотного двигателя постоянного тока бииндукторного типа (ДПТБТ) [7].

Повышение коэффициента полезного действия. Существует несколько способов повышения КПД такой электрической машины: либо уменьшение плотности тока обмотки якоря, либо увеличение диаметра электрической машины, либо их комбинация.

Уменьшение плотности тока обмотки якоря приводит к увеличению массы меди, но при этом к меньшему фактическому нагреванию обмотки, что существенно повышает ее надежность и долговечность.

Увеличение диаметра электрической машины приводит к увеличению числа витков секции обмотки якоря и, соответственно, росту потерь.

Однако уменьшению числа оборотов МПТ не соответствует пропорциональное увеличение числа проводников обмотки якоря, что обусловлено наличием большого падения напряжения в цепи якоря.

Анализ машин постоянного тока наиболее востребованных на рынке мощностей 7,5 – 75 кВт показывает, что высота оси вращения для наиболее мощ-

© Винаков А.Ф., Косенков В.Д., Яковлев А.В.,
Ивлев Д.А., 2015

ных электрических машин из этой группы составляет 225 – 250 мм при четырех полюсах.

Но для получения высокого значения КПД машины с малым номинальным числом оборотов требуют существенно большего числа полюсов, так как частота вращения ротора обратно пропорциональна числу пар полюсов при заданных $U, a, N, \Phi = \text{const}$:

$$n = \frac{U}{C_e \cdot \Phi} = \frac{U \cdot 60 \cdot a}{p \cdot N \cdot \Phi}$$

Однако попытки установить большое число полюсов в МПТ классической конструкции с относительно небольшим диаметром обычно связаны со значительными конструкторско-технологическими трудностями.

Двигатель постоянного тока бииндукторного типа, напротив, эффективно проявляет себя на низких оборотах, используя схему одноименнополюсной индукторной машины с общей для всех полюсов обмоткой возбуждения.

В таблице приведены сравнительные данные классической МПТ серии Р без компенсационной обмотки (индекс N) компании Sime Motori, ведущего европейского производителя МПТ и ДПТБТ.

1. Сравнительные данные классической МПТ серии Р без компенсационной обмотки

Значения	Р160NM	ДПТБТ
P, кВт	12	12
U, В	400	400
n, об/мин	440	440
M, Н·м	259	261
КПД, %	71,4	83
2p	4	6
h, мм	160	160

Как видно из таблицы, увеличение числа полюсов при средних рекомендуемых значениях коэффициента полюсного перекрытия $\alpha_\delta = 0,75$, индукции $B_\delta = 0,8$ Тл, линейной токовой нагрузке $A = 5 \cdot 10^4$ А/м, плотности тока в обмотке якоря $j_a = 5$ А/мм² позволило существенно повысить КПД ДПТБТ при неизменной высоте оси вращения. Следует отметить, что тот же двигатель, но с компенсационной обмоткой Р160КМ (индекс К) имеет КПД = 66,7 %.

Повышение перегрузочной способности. В ДПТБТ паз электрической машины открыт с обеих сторон, что позволяет существенно ослабить поле поперечной реакции якоря путем снижения магнитной проводимости магнитопровода в поперечном направлении и отказаться от компенсационной обмотки (рис.1, а и б).

При этом величину рабочего воздушного зазора можно принимать минимально возможной по условиям технологии, что приводит к уменьшению потерь на возбуждение.

На рис. 2 показаны кривые распределения индукции поля реакции якоря ДПТБТ и классической МПТ с общим ярмом привода нереверсивного прокатного стана $P_n = 6000$ кВт; $U_n = 825$ В; $n_n = 200$

об/мин, полученное с помощью программы ELCUT версии 4.1 путем расчета магнитного поля в плоскопараллельной области методом конечных элементов.

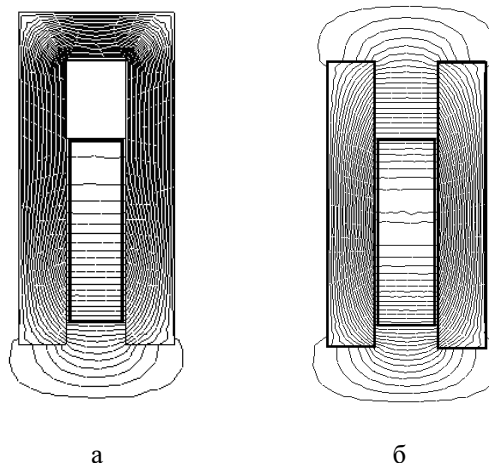


Рис.1. Конструкция паза:
 а – МПТ с общим ярмом; б – ДПТБТ без общего ярма

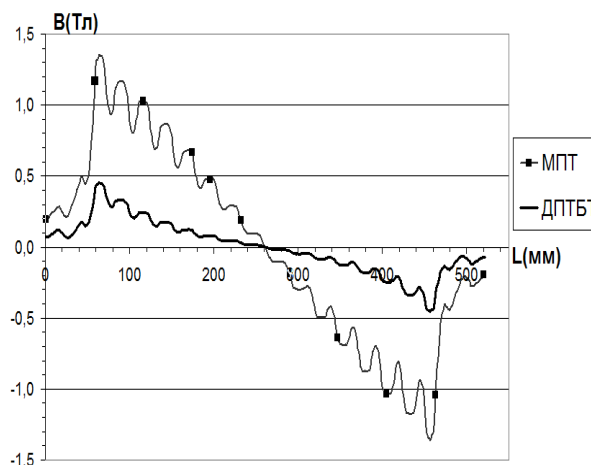


Рис. 2. Кривые распределения индукции поля реакции якоря МПТ и ДПТБТ

При сохранении одних и тех же значений $A=5 \cdot 10^4$ А/м; $B_\delta=1$ Тл; $\alpha_\delta=0,75$; $2p=18$; $j_a=5,66$ А/мм²; $j_{об}=2,3$ А/мм²; $D_a=3,1$ м, рабочего воздушного зазора $\delta_0=8$ мм, несмотря на то, что активная длина проводника ℓ_δ возросла на 30 %, масса меди ДПТБТ уменьшилась на 27 %, а масса активных материалов – на 8 %.

При $\delta_0=4$ мм масса меди ДПТБТ уменьшилась на 35 %, а масса активных материалов – на 10 %. Как показали расчеты МПТ и ДПТБТ, кривые распределения индукции поля реакции якоря практически совпадают при двукратной перегрузке по току у МПТ и пятикратной у ДПТБТ.

Расчет ДПТБТ проводился по инженерной методике, разработанной в рамках НИР [8].

Конструкция ДПТБТ. Магнитная система ДПТБТ (рис. 3, а, б и в) не имеет общего ярма и состоит из ряда магнитно-несвязанных зубцов Ш-образной формы 1, между которыми уложены секции обмотки якоря 2, обмоток возбуждения 3 и полюсов 4.

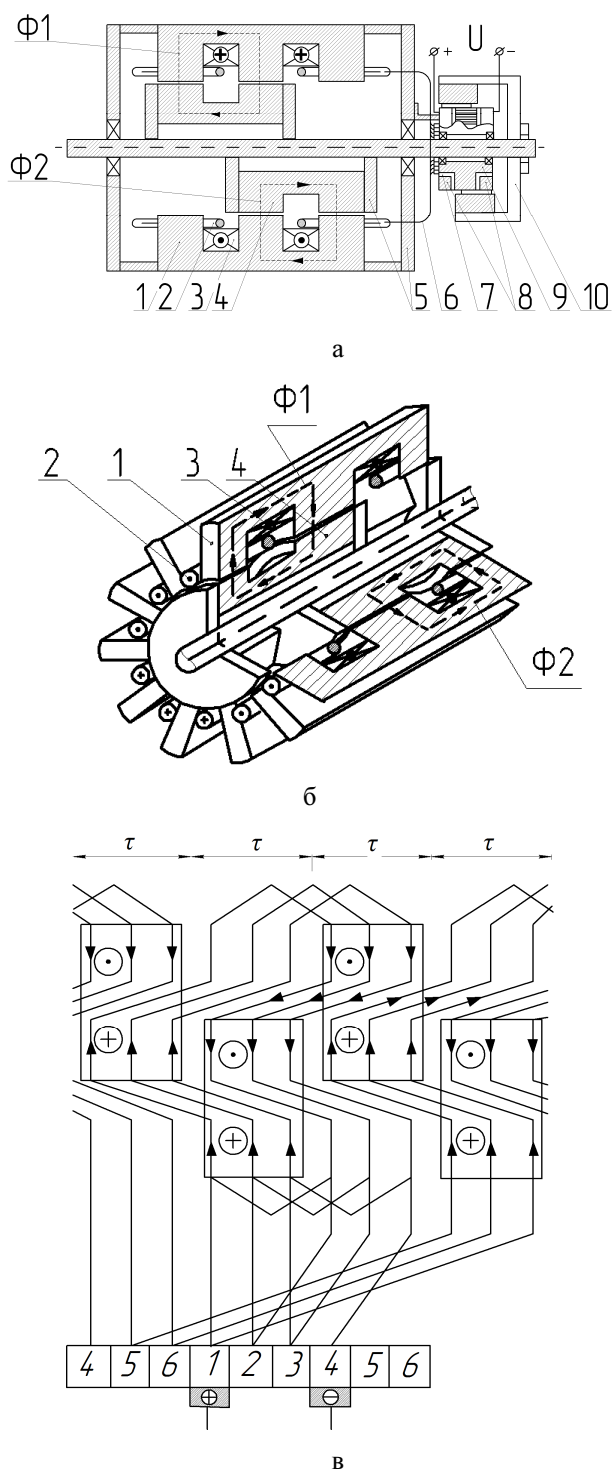


Рис. 3. Двигатель постоянного тока бииндукторного типа:

а – продольный разрез; б – аксонометрия;
 в – обмотка якоря

Работает ДПТБТ следующим образом: при подаче напряжения на тороидальные обмотки возбуждения 3 взаимодействием основных встречно-параллельных магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 и магнитного потока, созданного токами проводников секций обмотки якоря 2, находящихся в зоне действия полюсов 4 цилиндрического ротора, создается сила и момент вращения, под действием которого ротор начинает вращение. Пита-

ние секций обмотки якоря обеспечивается коллектором, установленным неподвижно на подшипниках. С обеих сторон коллектора через изоляционные прокладки 7 дополнительно установлены контактные кольца 8, к которым подводится напряжение сети. К коллекторным пластинам 9 подключены выводы секций обмотки якоря, объединенные жгутом 6. Траверы 10, конструктивно объединенные со щетками, жестко соединены с валом. Щетки, одновременно контактируя с контактными кольцами и соответствующими коллекторными пластинами, выполняют функции, как токоотвода, так и токораспределения секций. Вместо механического коллектора в ДПТБТ также можно использовать полупроводниковый коммутатор.

Секции обмотки якоря укладываются с частичным сдвигом на величину полюсного деления τ (рис. 3, в). Этим обеспечивается однонаправленность результирующего магнитного потока, пронизывающего секцию и, соответственно, сохранение электромагнитного момента заданного знака. Так как обмотка якоря находится под обмоткой возбуждения (рис. 3, а), тангенциальное смещение секции обмотки якоря происходит в окне под обмотку возбуждения.

Являясь электрической машиной индукторного типа, ДПТБТ использует только 66 % активной поверхности статора в преобразовании энергии. Кроме того, из-за перемагничивания Ш-образных зубцов возрастают потери в стали. Это, казалось бы, однозначно говорит о снижении КПД ДПТБТ по сравнению с классическим двигателем. Однако в ДПТБТ увеличение потерь в обмотке якоря и потерь в стали компенсируется отсутствием компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов.

Технологичность машины постоянного тока бииндукторного типа. Пакеты зубцов и полюсов формируются в кондукторе на специальной оправке соответствующего радиуса и поэтому не требуют механической обработки для соответствия радиусам активных поверхностей.

После опрессовки пакеты фиксируются заклепками и располагаются в немагнитных стопорных кольцах 5 (рис. 3, а) гребенчатого вида статора и ротора. Зубцовая зона такой машины состоит из прямоугольных зубцов и трапециевидных пазов, обеспечивающих хорошую фиксацию пазового клина.

Применение машины постоянного тока бииндукторного типа. Расчеты показывают высокий потенциал данной конструкции, которая может работать как генератором, так и двигателем [9 – 10].

В частности, применение ДПТБТ в качестве привода лифтов позволяет увеличить КПД лифта для процесса перемещения кабины с грузом до 86,45 % по сравнению с 50,87 % при использовании асинхронного привода с редуктором [11].

Выводы. Приведенные данные подтверждают перспективность ДПТБТ, так как при простоте и меньшей себестоимости изготовления использование его в соответствующих промышленных механизмах позволит повысить их производительность, уменьшить потери энергии как в установившемся, так и в переходных режимах.

Список использованной литературы

References

1. Козаченко В. Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам / В. Ф. Козаченко // Новости о микросхемах. CHIP NEWS. – М. : –1999. – Вып. 1 (34). – С. 2 – 10. Url:<http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/199901/2.html>.
2. Булгар В. В. Высокомомментный двигатель постоянного тока с комбинированным возбуждением / В. В. Булгар, А. Д. Ивлев, А. В. Яковлев // Электромашиностроение и электрооборудование. – К. : – 2006. – Вып. 66. – С. 241 – 242.
3. Винаков А. Ф. Двигатель постоянного тока индукторного типа для передачи вращения в герметичный объем / А. Ф. Винаков, А. Д. Ивлев // Электромашиностроение и электрооборудование. – К. : – 2006. – Вып. 66. – С. 243 – 244.
4. Булгар В. В. Принципы построения манипуляторов на основе линейных двигателей постоянного тока индукторного типа и с дисковым ротором / В. В. Булгар, Д. А. Ивлев, Д. В. Шурундин // Электромашиностроение и электрооборудование. – К. : – 2008. – Вып. 70. – С. 37 – 44.
5. Булгар В. В. Низкоскоростная электрическая машина./ В. В. Булгар, А. Д. Ивлев, Д. А. Ивлев, А. В. Яковлев // Вестник НТУ «ХПИ» «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – Харьков : – 2008. – Вып. 30. – С. 460 – 461.
6. Булгар В. В. Низкоскоростная торцевая электрическая машина бииндукторного типа / В. В. Булгар, А. Д. Ивлев, Д. А. Ивлев // Вестник НТУ «ХПИ» «Проблемы автоматизированного. Теория и практика». – Харьков : – 2010. – Вып. 28. – С. 436 – 437.
7. Патент України № 104943, Україна, МПК(2006.01) Н02К29/06. Электрична машина биіндукторного типу / О. А. Андриющенко, В. В. Булгар, А. О. Бойко, А. Д. Івлев, Д. А. Івлев, О. В. Яковлев, В. Д. Косенков: – а201211580, заявл.08.10.2012; опубл. 25.03.2014. Бюл. № 6.
8. Отчёт о НИР № 439-54. Исследование и разработка класса электрических двигателей постоянного тока с безобмоточным ротором.: руководитель В. В. Булгар, ОНПУ, 2007.
9. Булгар В. В. Регулируемый электропривод постоянного тока безредукторной лебедки пассажирского лифта / В. В. Булгар, А. А. Бойко, Д. А. Ивлев // Труды Одесского политехнического ун-та. – Одесса : – 2013. – Вып. 3(42) – С. 101 – 117.
10. Андриющенко О. А. Вимоги до приводного двигуна безредукторної лебідки пасажирського ліфта / О. А. Андриющенко, В. В. Булгар, А. О. Бойко, Д. А. Івлев // Електротехнічні та комп'ютерні системи – К. : – 2011. – № 03 (79). – С. 163 – 166.
11. Бойко А. А. Электромеханическое преобразование энергии в подъемных механизмах лифтов / А. А. Бойко, Д. А. Ивлев, В. В. Булгар // Подъемно-транспортная техника – Одесса : – 2013. – Вип. 4(40) – С.28 – 35.

Получено 25.05.2015

1. Kozachenko V.F. Osnovnye tendencii razvitiya vstroennyh sistem upravleniya dvigateljami i trebovaniya k mikrokontrolleram [Major Trends in Embedded Motor Control Systems and Requirements for Microcontrollers], (1999), *Novosti o Mikroshemah. CHIP NEWS*, Moscow, Russian Federation, Vol. 1 (34), pp. 2 – 10 (In Russian). Available at: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/199901/2.html>
2. Bulgar V.V., Ivlev A.D., and Jakovlev A.V. Vysokomomentnyj dvigatel' postojannogo toka s kombinirovannym vzbuzhdeniem [Direct-Current Motor with a Complicated Excitement], (2006), *Jelektromashinostroenie i Elektrooborudovanie*, Kiev, Ukraine, Vol. 66, pp. 241 – 242 (In Russian).
3. Vinakov A.F., and Ivlev A.D. Dvigatel' postojannogo toka induktornogo tipa dlja peredachi vrashhenija v germetichnyj ob'em [Current Inductor of a Type for Enter Rotation into Tight Volume], (2006), *Jelektromashinostroenie i Elektrooborudovanie*, Kiev, Ukraine, Vol. 66, pp. 243 – 244 (In Russian).
4. Bulgar V.V., Ivlev D.A., and Shurundin D.V. Principy postroenija manipuljatorov na osnove linejnyh dvigatelej postojannogo toka induktornogo tipa i s diskovym rotorom [Principles of Design of Manipulators on the Basis of Linear DC Motors with Inductor-type Disc Rotor], (2008), *Jelektromashinostroenie i Elektrooborudovanie*, Kiev, Ukraine, Vol. 70, pp. 37 – 44 (In Russian).
5. Bulgar V.V., Ivlev A.D., Ivlev D.A., and Jakovlev A.V. Nizkoskorostnaja jelektricheskaja mashina [Low-speed Electric Machine], (2008), *Vestnik NTU HPI "Problemy Avtomatizirovannogo Elektroprivoda: Teorija i Praktika" Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 30, pp. 460 – 461 (In Russian).
6. Bulgar V.V., Ivlev A.D., and Ivlev D.A. Nizkoskorostnaja torcevaja jelektricheskaja mashina biinduktornogo tipa [Low-speed End Direct-current Motor Biinductor-type.], (2010), *Vestnik NTU HPI "Problemy Avtomatizirovannogo Elektroprivoda: Teorija i Praktika" Publ.*, Kharkov, Ukraine, Vol. 28, pp. 436 – 437 (In Russian).
7. Patent of Ukraine No.104943, MPK (2006.01), NO2K 29/06 Electrical machine biinductor-type / O.A. Andrijushhenko, V.V. Bulgar, A.O. Bojko, A.D. Ivlev, D.A. Ivlev, O.V. Jakovlev, V.D. Kosenkov: a 201211580, decl.08.10.2012, publ. 25.03.2014, Bulletin No. 6.
9. Otchjot o NIR No. 439-54, Issledovanie i razrabotka klassa jelektricheskijh dvigatelej postojannogo toka s bezobmotochnym rotorom [Research and Development of a Class of Direct-current Motors with a Windingless Rotor], (2007), *Rukovoditel V.V.Bulgar, ONPU*, (In Russian).
10. Bulgar V.V., Bojko A.A., and Ivlev D.A. Reguliруemyj jelektroprivod postojannogo toka bezreduktornoj lebedki passazhirskogo lifta [Variable Speed Direct-current Drive of a Gearless Windlass of a Passenger Lift], (2013), *"Trudy Odesskogo Nacional'nogo Politehnicheskogo Universiteta" Publ.*, Odessa, Ukraine, Vol. 3(42), pp. 101 – 117 (In Russian).

11. Andriushchenko O.A., Bulgar V.V., Boyko A.O., and Ivlev D.A. Vymohy do pryvodnoho dvyhuna bezreduktornoyi lebidky pasazhyrs'koho lifta [The Requirements to Driving Motor of the Passenger Lift Reducer Free Winch], (2011), *Naukovo-Tekhnichnij Zhurnal "Elektrotekhnichni ta Komp'yuterni Sistemi"* Odessa, Ukraine, Vol. 03 (79), pp. 163 – 166 (In Ukrainian).

12. Bojko A.A., Bulgar V.V., and Ivlev D.A. Jel-ektromehanicheskoe preobrazovanie jenerгии v pod'emnyh mehanizmah liftov [Electromechanical Energy Conversion in Elevating Lift Mechanism], (2013), *"Podemno-transportnaja Tehnika"* Odessa, Ukraine, Vol. 4 (40), pp. 28 – 35 (In Russian).



Винаков

Александр Федорович, канд. техн. наук, доц. каф. теоретических основ и общей электротехники Одесского нац. политехнического ун-та.

65044, г. Одесса, пр. Шевченко, 1.
Тел: +38048-7058-565.

E-mail: afvinakov@gmail.com



Косенков

Владимир Данилович, канд. техн. наук, проф., зав. каф. физики и электротехники Хмельницкого нац. ун-та.

29016, г. Хмельницкий, ул. Институтская, 11.

E-mail: fpkts@khnu.km.ua



Яковлев

Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц. каф. теоретических основ и общей электротехники Одесского нац. политехнического ун-та.

65044, г. Одесса, пр. Шевченко, 1.
Тел: +38048-7058-565.

E-mail: yakoval_vlad@ukr.net



Ивлев

Дмитрий Анатольевич, ст. науч. сотр. каф. теоретических основ и общей электротехники Одесского нац. политехнического ун-та.

65044, г. Одесса, пр. Шевченко, 1.
Тел: +38048-7058-565.

E-mail: ivlevs@te.net.ua