

УДК 621.313.333.2

В. С. ПЕТРУШИН, Р. Н. ЕНОКТАЕВ**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕГУЛИРУЕМЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Для проектування регульованих асинхронних двигунів використані комплексні математичні моделі керованих електроприводів, що забезпечують спільний розгляд перетворювачів, двигунів і механізмів. Застосовуються проектні критерії, що відносяться як до регульованого асинхронного двигуна, так і до всього керованого електроприводу, які розділені на дві групи: масогабаритновартісну і енергетичнозатратну. При багатокритеріальній оптимізації застосовується узагальнений критерій, що представляє собою скалярну згортку вищевказаних критеріїв з різними коефіцієнтами їх значимості. Модифікований критерій зведених витрат електроприводу, що відноситься до другої групи, дозволяє враховувати такі фінансові аспекти як витрати на виготовлення та експлуатацію двигуна і приводу, інфляційні процеси і узгоджується з діапазонним критерієм ККД за допомогою коефіцієнта значимості експлуатації $k_{з3}$. Виконана багатокритеріальна оптимізація, в результаті якої екстремум модифікованого критерію зведених витрат електроприводу з енергетичнозатратної групи знаходиться при використанні другого критерію з масогабаритновартісної групи.

Ключові слова: регульований асинхронний двигун, оптимізаційне проектування, узагальнений критерій проектування, модифікований критерій зведених витрат електроприводу, багатокритеріальна оптимізація.

Для проектирования регулируемых асинхронных двигателей использованы комплексные математические модели управляемых электроприводов, обеспечивающие совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и механизмов. Применяются проектные критерии, относящиеся как к регулируемому асинхронному двигателю, так и ко всему управляемому электроприводу, которые разделены на две группы: массогабаритностоимостную и энергетическозатратную. При многокритериальной оптимизации применяется обобщенный критерий, представляющий собой скалярную свертку вышеуказанных критериев с различными коэффициентами их значимости. Модифицированный критерий приведенных затрат электропривода, относящийся ко второй группе, позволяет учитывать такие финансовые аспекты как затраты на изготовление и эксплуатацию двигателя и привода, инфляционные процессы и согласовывается с диапазоным критерием КПД с помощью коэффициента значимости эксплуатации $k_{з3}$. Выполнена многокритериальная оптимизация, в результате которой экстремум модифицированного критерия приведенных затрат электропривода из энергетическозатратной группы находится при использовании второго критерия из массогабаритностоимостной группы.

Ключевые слова: регулируемый асинхронный двигатель, оптимизационное проектирование, обобщенный критерий проектирования, модифицированный критерий приведенных затрат электропривода, многокритериальная оптимизация.

For the design of controlled asynchronous motors used complex mathematical models of controlled electric drives, providing joint consideration converters, motors and mechanisms. Apply design criteria relating to both the regulated induction motor, and to all Motor Control, which are divided into two groups: the weight and size of cost and energy costly. When multi-criteria optimization applied generalized criterion, which is a scalar convolution of the above criteria with different coefficients of importance. Modified criteria given electric costs related to the second group takes into account such aspects as the financial costs of construction and operation of the engine and drive inflation and a range of criteria agreed upon with the efficiency by a factor of significance $k_{з3}$ operation. Completed multi-criteria optimization, resulting in extremum modified criterion reduced costs from the energy cost-electric Group is using the weight and size of the second criterion of the value of the group.

Keywords: adjustable induction motor, optimization design, synthesis design criteria modified criterion reduced costs electric, multi-objective optimization.

Введение. Для анализа работы и проектирования регулируемых асинхронных двигателей (РАД) управляемых электроприводов необходимо совместное рассмотрение преобразователей, двигателей и механизмов, а также, при необходимости, согласующих трансформаторов и редукторов. Управляемый электропривод может быть представлен комплексной математической моделью, которая включает в себя модели всех составляющих привода [1,2,3]. Такой подход реализован в программе DIMASDrive [4].

Выбор критерия оптимальности является ответственным этапом проектирования [5]. Для общепромышленных асинхронных двигателей (АД) основного исполнения целевая функция, как правило, функция приведенных затрат (ПЗ) на производство и эксплуатацию. Для узкоспециализированных машин Критериями оптимальности могут быть и другие показатели, определяемые потребителем. При проектировании РАД для приводов с полупроводниковыми преобразователями (ПП), как и при выборе серийных АД для этих приводов, могут использоваться также такие критерии, как масса, габариты, стоимость двигателя или диапазонные критерии – энергетические показатели двигателя. Особые диапазонные критерии оптимальности обуславливают специфику их определения.

При многокритериальной оптимизации применяется обобщенный критерий, представляющий собой скалярную свертку вышеуказанных критериев с различными коэффициентами их значимости. Материальные, энергетические и трудовые ресурсы, необходимые для производства и эксплуатации РАД, должны использоваться с максимальной эффективностью, что может быть обеспечено только при их проектировании и оптимизации на основании применения научно обоснованных критериев. Тенденции, определяемые повышением стоимости энергоресурсов, обуславливают потребность в РАД с повышенными значениями КПД, хотя при этом наблюдается рост стоимости таких двигателей. В настоящее время проектируются и производятся энергоэффективные серии общепромышленных АД и аналогично следует разрабатывать РАД.

Постановка задачи. Рационально при проектировании энергосберегающих электродвигателей использовать в качестве проектного критерия КПД, максимум которого достигается в результате параметрической оптимизации. Проектирование РАД необходимо выполнять с учетом требования работы в определенном диапазоне частот вращения и это обстоятельство определяет специфику критерия оптимальности. Обоснованным является выбор диапазон-

ного критерия КПД, что обеспечит минимизацию энергетических потерь во всем диапазоне регулирования от n_1 до n_2 [6]:
$$\eta_{св} = \frac{1}{n_2 - n_1} \int_{n_1}^{n_2} \eta(n) dn.$$

Вместе с тем, предлагаемый диапазонный критерий КПД не учитывает финансовые аспекты, такие как затраты на изготовление и эксплуатацию двигателя и привода, коэффициент инфляции и другое. Такой учет осуществляется при использовании критерия ПЗ, который в случае проектирования РАД является также средндиапазонным. При модификации критерия ПЗ электропривода необходимо учитывать влияние на критерий инфляционных процессов, поскольку нормативные сроки окупаемости РАД достаточно продолжительные (5-8 лет) [7]. Кроме того, за время службы двигателя энергетическая составляющая ПЗ в несколько раз превышает составляющую, связанную с капитальными затратами, поэтому первостепенным является оптимизация энергетической составляющей.

Модифицированный критерий ПЗ электропривода необходимо согласовать с критерием КПД, т.е. приблизить их экстремумы. Для этого используется коэффициент значимости эксплуатации $k_{зэ}$. Целесообразно также введение в модифицированный критерий ПЗ коэффициента инфляции $k_{инф}$, который учитывает процессы обесценивания денежной массы.

Следует отметить, что при работе РАД в составе современных частотно-регулируемых электроприводов из-за близости коэффициента мощности привода к 1 из выражения критерия ПЗ электропривода может быть исключена составляющая, соответствующая стоимости компенсации реактивной энергии [7].

С учетом вышесказанного выражение для модифицированного критерия ПЗ электропривода имеет вид

$$ПЗ_{эп} = \frac{C_{эм}}{k_{зэ}} + C_{эп} \cdot (k_{ам} + k_{об}) \cdot k_{инф} + C_{па} \cdot k_{инф}, \quad (2)$$

где $C_{эп}$ – стоимость электропривода;
 $C_{па}$ – стоимость потерь активной энергии;
 $k_{ам}$ – коэффициент, учитывающий амортизационные отчисления;
 $k_{об}$ – коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание электропривода;
 $k_{зэ}$ – коэффициент значимости эксплуатации $k_{зэ}$;
 $k_{инф}$ – коэффициент инфляции.
 Значение $k_{инф}$ рассчитывается следующим образом

$$k_{инф} = \frac{\sum_{m=0}^{T_n-1} (1 + \frac{d_{инф}}{100\%})^m}{T_n}, \quad (3)$$

где T_n – нормативный срок окупаемости электропривода;

$d_{инф}$ – показатель годовой инфляции (в %).

Аналогичным образом выполнена модификация критерия ПЗ для проектирования общепромышленных АД [8].

Возможно проведение многокритериальной оптимизации, в результате которой экстремум какого-либо критерия из энергетическозатратной группы находится при использовании второго критерия из массогабаритностоймостной группы. Таким образом удовлетворяются критерии из двух “антагонистических” групп, причем, как основной принимается критерий из энергетическозатратной группы, а критерий из массогабаритностоймостной группы выступает в качестве ограничения.

Результаты исследований. Многокритериальная оптимизация выполнена на примере двигателя 4А160М2У3. Представлена проектная задача с использованием схемы соединения обмотки статора “звездой”. Рассматривается работа двигателя в РЭП с частотным преобразователем (Altivar 58, 1500 у.е., 15 кг, $\eta_{пр}=0,94$) при законе частотного управления $U/f = const$. В качестве нагрузки используется “лифтовая” нагрузка величиной 58 Н·м. Задан диапазон регулирования 540–3600 об/мин. Выполнено определение коэффициента значимости эксплуатации ($k_{зэ}$) для согласования максимума КПД и минимума ПЗ электропривода (ПЗ_{эп}). Экстремумы этих критериев зависят только от варьируемых переменных, отвечающих массогабаритностоймостной составляющей. При введении коэффициента $k_{зэ}=15$ экстремумы критериев совпадают. Кроме того был использован коэффициент инфляции, равный 1,192, что соответствует показателю ежегодной инфляции – 5% при сроке окупаемости $T_n = 5$ лет.

В первом ряде опытов были рассмотрены одновременно два критерия - КПД и массы двигателя. В качестве варьируемых параметров выбраны длина пакета статора двигателя (L) с диапазоном изменения от 0,8 до 1,2 базового значения, частота, на которую проектируется обмотка статора (ОС) двигателя (f) с диапазоном изменения от 0,8 до 1,2 базового значения, высота паза статора ($H1$) с диапазоном изменения от 0,5 до 1,5 базового значения и ширина паза статора (GP) с диапазоном изменения от 0,5 до 1,5 базового значения, число зубцов ротора (ZR) с диапазоном изменения от 0,7 до 1,3 базового значения, диаметр первой окружности паза ротора ($D1$) с диапазоном изменения от 0,7 до 1,3 базового значения, диаметр второй окружности паза ротора ($D2$) с диапазоном изменения от 0,5 до 1,5 базового значения, расстояние между центрами окружности ($A2$) с диапазоном изменения от 0,5 до 1,5 базового значения (рис. 1.). Изменение частоты предполагает автоматическое изменение числа витков ОС (W_1), сечения эффективного проводника ОС ($q_{эф}$), диаметра обмоточного провода ($d_{пр}$).

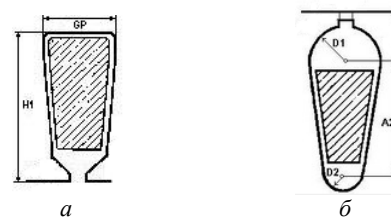


Рис.1– Пазы оптимизируемого двигателя. а – статора; б – ротора

Критерий массы двигателя использовался как

ограничение с определенным коэффициентом значимости (в % или относительных единицах от максимального коэффициента значимости).

В табл. 1 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух вышеуказанных критериев проектирования.

Таблица 1 – Проектные критерии и конструктивные изменения

| Двигатели Показатели | Серийный | Спроектированный по критериям: | | | | |
|-----------------------------------|----------|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | КПД–100%, масса–0% | КПД–100%, масса–10% | КПД–100%, масса–20% | КПД–100%, масса–30% | КПД–100%, масса–40% |
| ПЗ _{эп} , у.е. | 5838 | 5501 | 5497 | 5458 | 5453 | 5482 |
| $\eta_{\text{эп}}$ | 71,81 | 78,65 | 78,62 | 78,22 | 76,70 | 75,43 |
| $\eta_{\text{ад}}$ | 76,12 | 83,37 | 83,34 | 82,91 | 81,30 | 79,96 |
| Масса АД, кг | 120 | 139 | 138 | 132 | 120 | 112 |
| Стоимость АД, у.е. | 638 | 784 | 780 | 737 | 659 | 610 |
| Объем АД, дм ³ | 9,62 | 11,48 | 11,49 | 10,76 | 9,47 | 8,35 |
| f , Гц | 50 | 57,51 | 58,26 | 59,51 | 57,22 | 54,85 |
| W_1 | 84 | 73 | 72 | 71 | 73 | 77 |
| $q_{\text{эф}}$, мм ² | 2,76 | 5,31 | 5,31 | 4,87 | 4,12 | 3,60 |
| L , мм | 130 | 155,1 | 155,3 | 145,4 | 128 | 112,9 |
| D_1 , мм / D_2 , мм | 7 / 4,2 | 7,96 / 4,55 | 8,21 / 4,25 | 7,64 / 4 | 8,69 / 2,83 | 8,73 / 3,54 |
| A_2 , мм | 23,05 | 23,88 | 23,43 | 22,41 | 22 | 18,46 |
| H_1 , мм | 21 | 29,64 | 29,04 | 27,58 | 25,59 | 24,36 |
| GP , мм | 11,9 | 14,12 | 14,21 | 13,43 | 12,73 | 12,21 |
| ZR | 28 | 32 | 31 | 31 | 34 | 32 |

По данным табл. 1 были построены зависимости относительных значений критериев КПД и массы двигателя от коэффициента значимости критерия массы двигателя $k_{\text{экм}}$ (рис.2).

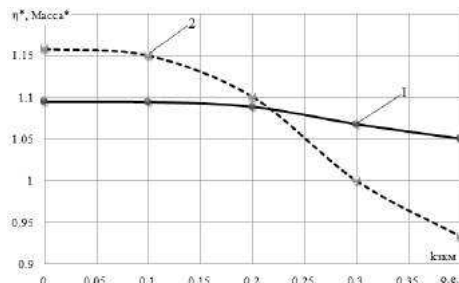


Рис. 2 – Оптимизация при двух критериях КПД (1) и массы двигателя (2)

Исходя из проведенных опытов зависимости относительных значений критериев (за базы приняты критерии серийного двигателя) снижаются, не дают определенного решения, не формируется экстремум критерия КПД. Был проведен ряд других опытов многокритериальной оптимизации с использованием

модифицированного критерия ПЗ_{эп} и критерия массы двигателя. В качестве варьируемых выбраны параметры аналогичные предыдущему опыту.

В табл. 2 приведены значения проектных критериев и конструктивных изменений при использовании двух вышеуказанных критериев проектирования.

Таблица 2 – Проектные критерии и конструктивные изменения

| Двигатели Показатели | Серийный | Спроектированный по критериям: | | | | |
|-----------------------------------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | ПЗ _{эп} –100%, масса–0% | ПЗ _{эп} –100%, масса–10% | ПЗ _{эп} –100%, масса–20% | ПЗ _{эп} –100%, масса–30% | ПЗ _{эп} –100%, масса–40% |
| ПЗ _{эп} , у.е. | 4572 | 3998 | 3993 | 4077 | 4103 | 4215 |
| $\eta_{\text{эп}}$ | 71,81 | 78,41 | 78,30 | 76,89 | 76,36 | 74,86 |
| $\eta_{\text{ад}}$ | 76,12 | 83,12 | 82,99 | 81,5 | 80,94 | 79,35 |
| Масса АД, кг | 120 | 135 | 133 | 121 | 117 | 110 |
| Стоимость АД, у.е. | 638 | 750 | 734 | 665 | 635 | 585 |
| Объем АД, дм ³ | 9,62 | 11,09 | 11,2 | 9,53 | 9,18 | 8,25 |
| f , Гц | 50 | 58,54 | 59,56 | 58,36 | 58,53 | 57,74 |
| W_1 | 84 | 72 | 71 | 72 | 72 | 73 |
| $q_{\text{эф}}$, мм ² | 2,76 | 4,87 | 4,51 | 4,18 | 3,71 | 3,14 |
| L , мм | 130 | 150 | 151,4 | 128,7 | 124,1 | 111,6 |
| D_1 , мм / D_2 , мм | 7 / 4,2 | 7,74 / 4,25 | 7,81 / 3,3 | 8,55 / 3,58 | 8,68 / 3,94 | 8,18 / 3,84 |
| A_2 , мм | 23,05 | 23,18 | 21,54 | 20,382 | 15 | 14,68 |
| H_1 , мм | 21 | 27,67 | 26,82 | 25,071 | 24,18 | 21,27 |
| GP , мм | 11,9 | 13,63 | 12,78 | 12,94 | 11,86 | 11,6 |
| ZR | 28 | 32 | 36 | 30 | 33 | 32 |

По полученным данным были построены зависимости относительных значений критериев ПЗ_{эп} и массы двигателя от коэффициента значимости критерия массы двигателя (рис.3).

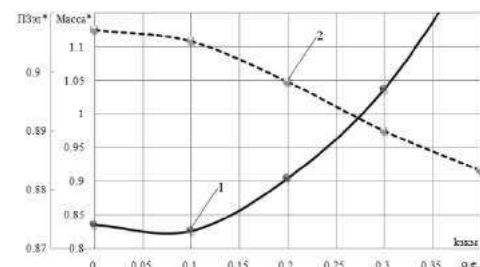


Рис. 3 – Оптимизация при двух критериях ПЗ_{эп} (1) и массы двигателя (2)

Исходя из проведенных опытов была определена точка экстремума критерия ПЗ_{эп}.

Выводы. 1. Результаты многокритериальной оптимизации с использованием различных критериев существенно отличаются. 2. Найден экстремум модифицированного критерия приведенных затрат электропривода из энергетическозатратной группы при

использовании второго критерия массы двигателя из массогабаритностоимостной группы. 3. Аналогичным образом может быть осуществлено многокритериальное оптимизационное проектирование для других проектных задач, в которых используются РАД различные по мощностям, конструктивным исполнениям, системам охлаждения и т.д.

Список литературы

1. *Lyshevski S. E.* Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics / S. E. Lyshevski. – CRC Press LLC, USA, 2000. – p. 782.
2. *Петрушин В.С.* Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе / В.С. Петрушин. – Одесса : Наука и техника, 2006. – с. 303.
3. *Leonhard W.* Control of Electrical Drives / W. Leonhard. – Springer Science & Business Media, 2001. – p. 460.
4. *Петрушин В.С.* Пат. 4065, Украина, Программный продукт „DIMASDrive”. Программа анализа работы, выбора и проектирования асинхронных короткозамкнутых двигателей систем регулируемого электропривода / В.С. Петрушин, С.В. Рябинин, А.М. Якимець – 2001.
5. *Jazdzynski W.* Multicriterial optimization of squirrel-cage induction motor design / W. Jazdzynski // IEEE Proceedings. – 1989. Vol. 136, Pt. B, № 6. – PP. 299–307.
6. *Петрушин В.С.* Диапазонные критерии оптимальности при проектировании регулируемых асинхронных двигателей / В.С. Петрушин // Труды Одесск. политехн. ун-та. – 2001. №1(13). – С. 81–86.
7. *Петрушин В.С.* Модификация критерия приведенных затрат электропривода для проектирования регулируемых асинхронных двигателей / В.С. Петрушин, Р.Н. Еноктаев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. – 2014. – № 38. – С. 132–137.
8. *Петрушин В.С.* Використання модифікованого критерію зведених витрат при розробці високоефективних асинхронних двигунів / В.С. Петрушин, А.М. Якімець, Н.А. Волощук // Електроінформ. – 2008. – №2. – С. 6–7.

References (transliterated)

1. S. E. Lyshevski. Electromechanical systems, electric machines, and applied mechatronics. USA, CRC Press LLC, 2000. 782 p.
2. Petrushin V.S. *Asinkhronnye dvigateli v reguliruemom elektroprivode* [Induction motors in the regulated electric drive]. Odessa, Nauka i tekhnika, 2006. 303 p.
3. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Berlin Heidelberg New York, Springer Science & Business Media, 2001. 460 p.
4. Petrushin V.S. Rjabinin S.V. and Iakimets' A.M. *Programmnyy produkt "DIMASDrive". Programma analiza raboty, vybora i proektirovaniya asinkhronnykh korotkozamknytykh dvigatelej sistem reguliruemogo jelektroprivoda*. ["DIMASDrive" software product. Program analysis of work, selection and design of induction motors short-regulated electric drive systems]. Patent UA, no.4065, 2001.
5. Jazdzynski, W. Deng. Multicriterial optimization of squirrel-cage induction motor design. *IEEE Proceedings*. 1985, vol. 136, pt. B, no 6, pp. 299–307.
6. Petrushin V.S. *Diapazonnye kriterii optimal'nosti pri proektirovanii reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei* [The range of optimality criteria in the design of controlled induction motors] *Trudy Odessk. politekhn. un-ta*. [Proceedings of the Odessa Polytechnic University]. Odessa, 2001, no. 1(13), pp. 81–86.
7. Petrushin V. S., Enoktaev R. N. *Modifikatsiia kriteriia privedennykh zatrat elektroprivoda dlia proektirovaniia reguliruemyykh asinkhronnykh dvigatelei* [Modification of the criterion given electric costs for the design of controlled induction motors]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "KhPI". Seriia : Elektrichni mashini ta elektromekhanichne peretvorennia energii* [Bulletin of the National Technical University "KPI". Series: Electrical machines and electro-mechanical energy conversion]. Kharkiv, 2014, no. 38, pp. 132–137.
8. Petrushin V.S., Iakimets' A.M., Voloshchuk N.A. *Vikoristannia modifikovanogo kriteriia zvedenikh vitrat pri rozrobtsi visokoeftivnykh asinkhronnykh dviguniv* [Using a modified criterion consolidated costs of developing highly efficient induction motors]. *Elektroinform*. 1985, no. 2, pp. 6–7.

Поступила (received) 03.02.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Использование многокритериальной оптимизации при проектировании регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 11–14. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Использование многокритериальной оптимизации при проектировании регулируемых асинхронных двигателей / В. С. Петрушин, Р. Н. Еноктаев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 11 (1183). – С. 11–14. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2409-9295.

Using a multi-criteria optimization in the design of controlled asynchronous motors / V. S. Petrushin, R.N. Yenoktaev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 11 (1183). – P. 11–14. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Петрушин Віктор Сергійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних машин одеського національного політехнічного університету, 65044, Одеса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)734-8494. E-mail: viktor_petrushin@ukr.net

Петрушин Віктор Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (048)734-8494. E-mail: viktor_petrushin@ukr.net

Petrushin Viktor Sergeevich – Sc.D., head of Electric Cars Department, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1,ONPU,ph.(048)734-8494. E-mail: viktor_petrushin@ukr.net

Еноктаєв Ростислав Миколайович – аспірант одеського національного політехнічного університету, 65044, Одеса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru

Еноктаєв Ростислав Николаевич – аспирант одесского национального политехнического университета, 65044, Одесса, проспект Шевченко, 1, ОНПУ, тел. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru

Yenoktaev Rostislav Nikolaievich – Postgraduate at the Department of Electric Cars, ONPU, 65044, Odessa, Shevchenko av.,1,ONPU, ph. (097)046-30-70. E-mail: rostik-enok@inbox.ru