

В.Х. Далека, Н.І. Кульбашна, А.І. Кузнецов

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ПІДВИЩЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

В статті представлено результати дослідження та пропозиції з підвищення енергоефективності електричних машин на основі інформаційних технологій в програмному середовищі „КОМПАС-3D”. Показано актуальність ресурсозбереження для транспортної галузі, де у великих обсягах споживаються матеріальні, енергетичні, фінансові та використовуються трудові й інформаційні ресурси. Зокрема, за статистичними даними підприємств електричного транспорту майже 95% електроенергії витрачається безпосередньо на забезпечення перевезень, тобто практично споживається електромашинами – тяговими та допоміжними електродвигунами рухомого складу. На основі аналізу досліджень та їх публікацій відносно автоматизованого проектування електричних машин визначено методи підвищення їх енергоефективності. Застосування методик проектування і виготовлення електричних машин на базі CAD/CAM-систем дає можливість вже на стадії проектування проводити прогнозування їх енергоефективності та вирішувати питання ресурсозбереження, якості і конкурентоспроможності. Створення ресурсозберігаючого, наприклад, електродвигуна це – процес знаходження його оптимальних параметрів або структури. Вибір оптимальної структури двигуна полягає у виборі конструкцій окремих елементів, кількості цих елементів і взаємозв'язку між ними, у визначенні просторового розташування цих елементів. Закладені у програму відповідні параметри двигуна уможливають його розробку без залучення математичного апарату, створення двигунів різної конфігурації і, в подальшому, розрахунку техніко-економічних показників, що оцінюють ефективність запропонованих рішень.

На прикладі тягового електродвигуна тролейбуса наведено залежності ККД від його геометричних параметрів, властивостей магнітних матеріалів, потужності машини, а також швидкості руху транспортного засобу. Показано доцільність вирішення питань ресурсозбереження протягом усього процесу проектування.

Ключові слова: ресурсозбереження, інформаційні технології, енергоефективність, електродвигун, системи автоматизованого проектування, коефіцієнт корисної дії.

Постановка проблеми

Ресурсозбереження визнано одним із пріоритетних напрямків економічного розвитку України. Актуальність цієї проблеми значно зростає при обмеженні практично усіх видів ресурсів та підвищення їх вартості. Оскільки більше 60 % електроенергії виробленої у світі споживається електроприладами, то підвищення їх енергоефективності та зменшення матеріаломісткості потребує нових технічних рішень на основі досягнень науково-технічного прогресу.

Особливо це важливо для транспортної галузі де у великих обсягах споживаються матеріальні, енергетичні, фінансові та використовуються трудові й інформаційні ресурси.

Зокрема, за статистичними даними підприємств електричного транспорту майже 95% електроенергії витрачається безпосередньо на забезпечення перевезень, тобто практично споживається

електромашинами – тяговими та допоміжними електродвигунами рухомого складу [1].

Завдання енергозбереження вимагають оптимальних рішень на протязі усіх етапів життєвого циклу електричних машин: дослідження, проектування, виробництва, експлуатації, ремонту та утилізації.

Тому для скорочення трудовитрат та забезпечення відповідного рівня якості при створенні електричних машин все ширше використовуються інформаційні технології, системи автоматизованого проектування (САПР). Об'єднання нових технічних засобів і математичних методів та програм в єдину систему САПР дає змогу перейти від окремих розрахунків до комплексної автоматизації проектування.

Застосування методик проектування і виготовлення електричних машин на базі CAD/CAM-систем дає можливість вже на стадії проектування проводити прогнозування їх енергоефективності та вирішувати питання ресурсозбереження, якості і конкурентоспроможності. Створення ресурсозбері-

гаючого, наприклад, електродвигуна це – процес знаходження його оптимальних параметрів або структури. Вибір оптимальної структури двигуна полягає у виборі конструкцій окремих елементів, кількості цих елементів і взаємозв'язку між ними, у визначенні просторового розташування цих елементів. Закладені у програму відповідні параметри двигуна уможливають його розробку без залучення математичного апарату, створення двигунів різної конфігурації і, в подальшому, розрахунку техніко-економічних показників, що оцінюють ефективність запропонованих рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням ресурсозбереження присвячено багато наукових досліджень та публікацій. Головна увага у роботі приділена тим, які забезпечують ресурсозбереження під час проектування двигунів.

В роботі [2] розглянута методика розрахунку електродвигуна постійного струму з високоерцитивними магнітами, що уможливає за вихідними даними (номінальним і максимальним обертовим моментом, частотою обертання, напруги живлення і коефіцієнтом корисної дії (ККД)) отримувати головні параметри електричної машини, що спрощує етап проектування електродвигунів.

Досвід використання досягнень інформаційних технологій під час проектування та виготовлення електродвигунів за індивідуальним замовленням розглядається у роботі [3].

Встановлено, що в результаті покрокової стратегії розробки підвищується «прозорість» виробничого процесу для замовника, зростає якість прийнятих рішень, знижується ймовірність подальших переробок.

У роботі [4] акцент зроблений на високій енергетичній ефективності пропорційного управління електричними колами якоря і збудження в діапазоні крутного моменту в електроприводах верстатів з різко змінним навантаженням.

Дослідження в роботі [5] зосереджені на розробці методів та інструментів, які допомагають проектувальникам в промисловості розробляти спеціальне обладнання. Доводиться важливість використання графічних пакетів в проектуванні, що дає змогу впливати на дизайн продукту.

У роботі [6] надана оцінка переваг енергозберігаючих двигунів порівняно зі стандартними двигунами з точки зору економії електроенергії і матеріалів.

На підставі системного підходу визначено ефективні шляхи забезпечення реального енергозбереження. Вказано, що для вдосконалення методів оптимізації необхідно створення програмно-обчислювального комплексу для проектування енергоефективних двигунів, що працюють в регульова-

них електроприводах. Вказано, що одним з перспективних засобів вдосконалення електроприводу є проектування і виготовлення спеціально для конкретних умов експлуатації [7].

У роботі [8] показано, що для поліпшення енергетичних і експлуатаційних характеристик асинхронних двигунів доцільне використання спеціалізованих інформаційних технологій і комп'ютерних моделей для проектування і перепроектування енергоефективних електричних машин. У роботі [9] запропонована розробка конструктивних рішень на основі параметричної оптимізації і розрахунку характеристик асинхронного двигуна в спеціалізованому програмному середовищі ANSYS Maxwell. Це дає змогу виконувати аналітичний розрахунок характеристик електричної машини з урахуванням її типу, геометричних параметрів, властивостей матеріалів, параметрів обмоток, моделювання, індукції, магнітного потоку та ін., використовувати параметричний аналіз і методи оптимізації на аналізі створюваних комп'ютерних моделей.

Під час моделюванні асинхронних двигунів, як показано у роботі [10], досліджується конструкція обмоток і елементів магнітопроводу машини для створення конструктивних рішень, що забезпечують досягнення цільових показників обраних параметрів, а також враховуються результати проміжних випробувань створюваних зразків для доопрацювання моделей.

Робота [11] доводить доцільність і практичну значимість методів машинного проектування електричних машин на основі аналізу комп'ютерних моделей. Застосування перепроектованих елементів магнітопроводу для машин загальнопромислового та спеціального призначення дозволяє досягти значного зниження енергоспоживання.

Робота [12] присвячена огляду програмних продуктів, що дають змогу проводити розрахунок, аналіз і моделювання фізичних процесів під час вирішення інженерних задач приладобудування. Це дозволило порівняти і оцінити функціональні можливості відомих програм і програмних пакетів, позначити область пошуку програмного продукту стосовно розв'язуваної задачі.

У роботі [13] показано важливість використання великого переліку програмного забезпечення для проектування електричних машин змінного струму.

У статті [14] пропонується модель синхронної машини з постійними магнітами з використанням програмних пакетів MATLAB/Simulink та стандартного лабораторного обладнання. Зазначено, що за допомогою грамотно побудованої програмної моделі інженери можуть перевірити працездатність своєї системи керування, проводити випробування з моделлю, і аналізувати варіанти, які було б важко або небезпечно реалізувати на реальному об'єкті.

У роботі [15] пропонуються три типи моделей, які задовольняють вимогам САПР і сучасним моделям для вивчення технологічних процесів: структурної моделі, яка дозволяє реалізувати системний підхід щодо управління якістю; стохастична модель з детермінованими операторами для її кількісної оцінки системи формування якості при проектуванні, виготовленні та експлуатації; імітаційну модель для моделювання і виготовлення двигунів.

Запропоновано моделі, загальні для проектування і виготовлення. Вони містять параметри, контрольовані в процесі виготовлення, для складальних одиниць і окремих деталей, відповідність якості вимогам стандартів. Такий підхід уможливує відчутне ресурсозбереження на стадії проектування за рахунок зниження розсіювання параметрів при виготовленні асинхронних двигунів.

Як показано у роботі [16], принцип конструювання механічних систем і поділ їх на стадії конструювання додає властивості адаптації до первинних та інших помилок, які треба враховувати ще на етапі розробки системи керування будь-якого виробу.

Отже наведені наукові дослідження розглядають різноманітні методи і заходи підвищення енергоефективності електричних машин. Все, що поєднує ці дослідження, – це необхідність врахування ресурсозбереження на початку створення машин, а саме на стадії їх проектування. Але не всі дослідження ґрунтуються на використанні автоматизованого проектування електричних машин, яке на сучасному етапі розвитку набуває найбільшої актуальності.

Тому метою роботи є забезпечення відповідного рівня ресурсозбереження під час проектування енергоефективних двигунів за рахунок удосконалення їх конструкції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати дослідження, які стосуються проектування енергоефективних двигунів та методів зменшення їх ресурсоемності.
2. Провести конструювання різних варіантів двигуна постійного струму за допомогою графічного пакету КОМПАС-3D.
5. Виконати експериментальні дослідження енергоефективності двигунів постійного струму.

Викладення загального матеріалу

Реалізація заходів ресурсозбереження у роботі реалізується на підставі попередньо створеного ескізу двигуна та конструкції сталевго пакета якоря із застосуванням графічного пакету „КОМПАС-3D”.

На рис. 1 показано діалогове вікно, в якому застосовані змінні величини для створення ескізу ста-

левого пакета якоря. В цьому ж діалоговому вікні створюються таблиці змінюваних величин, які додатково відображаються в програмі Excel для побудовання залежностей для експериментальних досліджень.

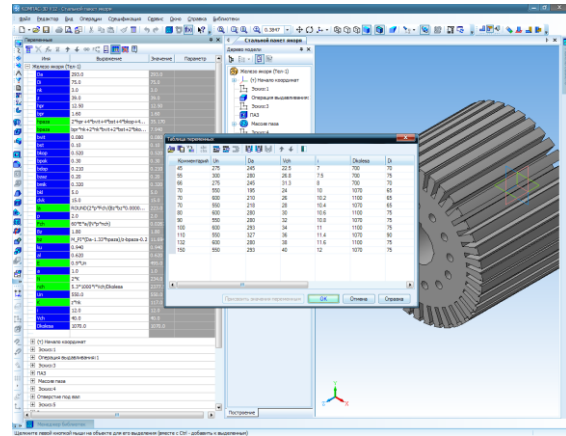


Рис. 1. Діалогове вікно, в якому відображаються змінні величини для створення ескізу сталевго пакета якоря

На підставі присвоєння нового значення діаметру та довжини сердечника якоря, проведено два варіанти змінювання габаритів сталевго пакета якоря (рис. 2).

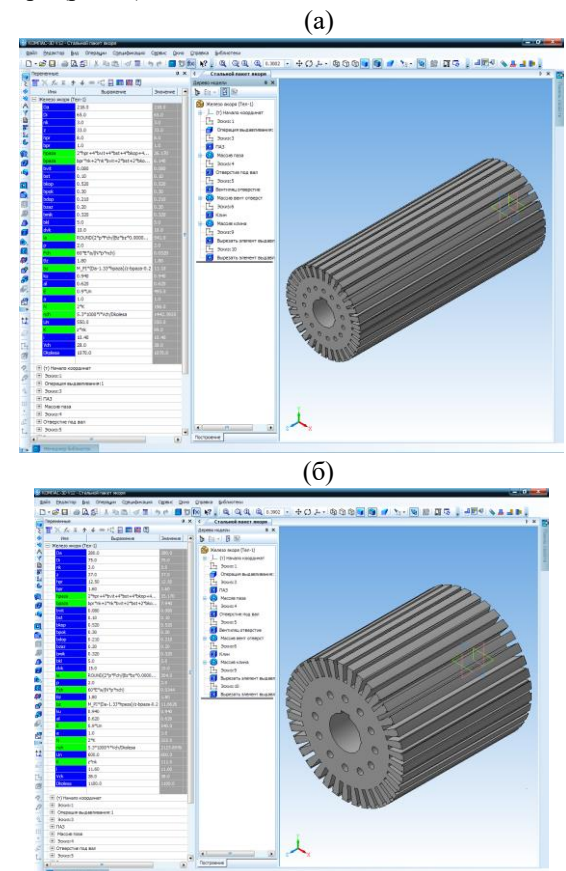


Рис. 2. Перший (а) і другий (б) варіанти змінювання параметрів сталевго пакета якоря
Така ж сама процедура стосується усього спроектованого тягового електродвигуна, на якому вид-

но, що за допомогою програми „КОМПАС-3D” виконуються не тільки змінювання габаритів двигуна, а і перестроювання всіх його елементів і вузлів.

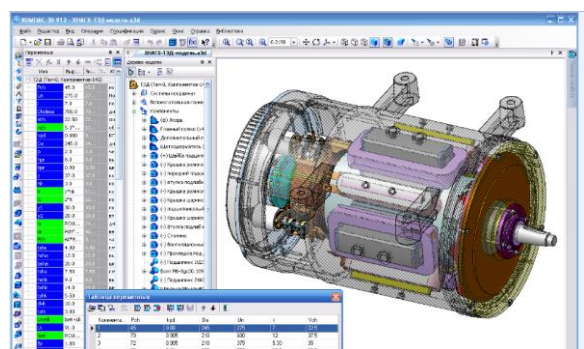
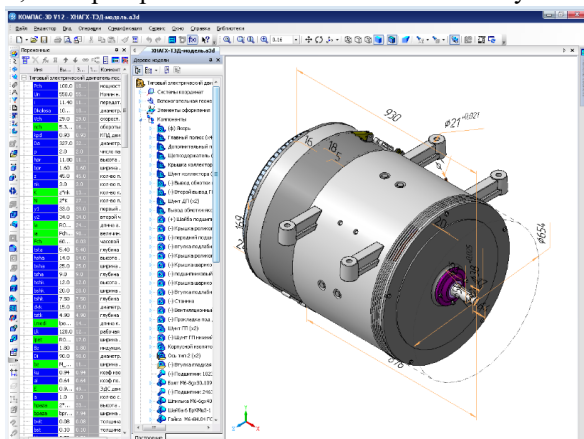


Рис. 3. Моделювання двигуна в різних варіантах виконання

На підставі графічного пакету „КОМПАС-3D” роботи були побудовані залежності, які характеризують значення ККД у разі змінювання потужності двигуна тролейбусної машини, її швидкості руху та діаметру якоря двигуна (рис. 4–6). Для цього були використані таблиці перемінних параметрів тягового електродвигуна (див. рис. 1). На рис. 4 – 6 кожна точка на графіках залежностей належить певному двигуну, який має свої параметри.

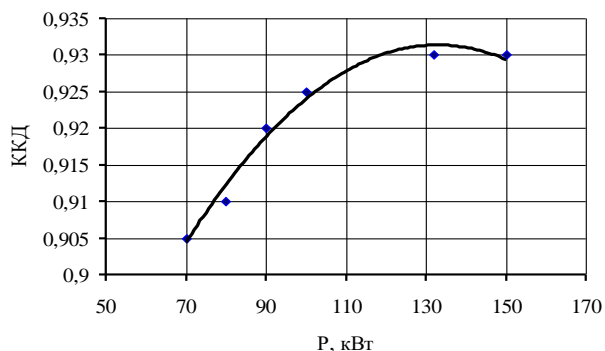


Рис. 4. Залежність ККД від потужності двигуна тролейбусу

Залежність на рис. 4 показує, що ККД зростає із зростанням потужності двигуна тролейбусу P , але до визначеної межі (з 130 кВт ККД зменшується).

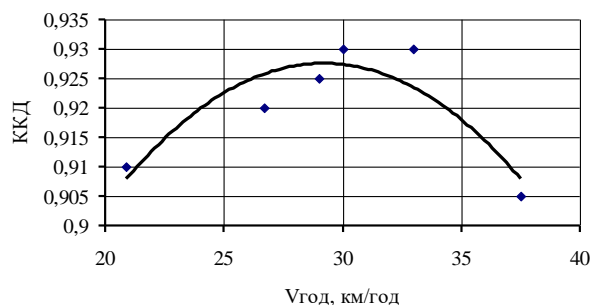


Рис. 5. Залежність ККД від швидкості тролейбусу

Залежність на рис. 5 показує, що ККД спочатку зростає із збільшенням частоти обертання якоря електродвигуна і відповідно швидкості тролейбусу $V_{год}$, а потім з 28 км/год ККД зменшується.

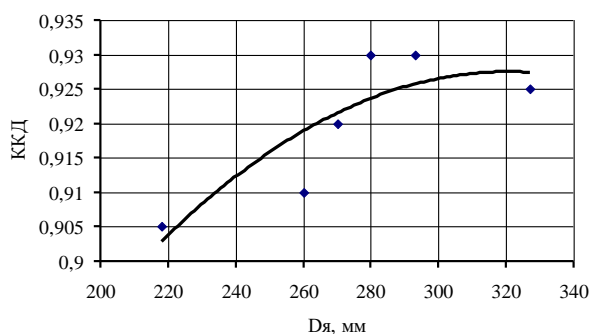


Рис. 6. Залежність ККД від діаметру якоря двигуна тролейбусу

Залежність на рис. 6 показує, що ККД зростає із зростанням діаметру якоря двигуна тролейбусу $D_{я}$, але така залежність має значну дисперсію експериментальних даних і не встановлює відповідної достовірності. Крім цього на рухомому складі електричного транспорту є обмеження за габаритними розмірами тягового двигуна.

Висновки

Таким чином, використання інформаційних технологій під час виготовлення двигунів забезпечує значне підвищення рівня ресурсозбереження ще на стадії проектування, особливо якщо врахувати, що ціна матеріалів швидко збільшується. Розглянуті способи легко реалізуються. Цей спосіб ресурсозбереження добре вписується в САПР на стадії оптимізації електричної машини.

Експериментальні дослідження ресурсозбереження на підставі конструктивних параметрів двигунів в програмному середовищі КОМПАС-3D дозволили отримати залежності, які характеризують зміни значення ККД у разі змінювання потужності

двигуна троллейбусної машини, її швидкості, діаметру якоря і кількості витків обмоток збудження. В подальшому рекомендується уточнити методики проектування тягових енергоефективних двигунів для різних видів електротранспорту.

Література

1. Далека В. Х. Наукові основи ресурсозбереження при експлуатації міського електричного транспорту: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.22; Нац. транспортний ун-т. К. 2005. 40 с.
2. Лютаревич А. Г., Долінгер С. Ю., Чепурко Н. Ю. Вопросы проектирования электродвигателей постоянного тока с высококоэрцитивными магнитами. *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 5.
3. Григорьев О., Евдокимов С., Масютин С. и др. Проектирование и изготовление электродвигателей по индивидуальному заказу. *САПР и графика*. № 3. 2003.
4. Usynin Y., Sychev D., Savosteenko N. Energy Saving in Pilger Mill Electric Drives Complete Solution. *In International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 8(4). 2017. С. 1673 – 1681.
5. Jauregui-becker J., Mulder W. Work in Progress: Developing Tools that Support the Design of Easily Maintainable Rolling Stock. *Procedia CIRP*. 2013. P. 204-206.
6. Zebardast A., Mokhtari H. Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving. *Conference: Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*. 2008.
7. Муравлева О. О. Энергоэффективные асинхронные двигатели для регулируемого электропривода. *Известия Томского политех. университета*. Т. 308. № 7. 2005. С. 135-139.
8. Разработка метода повышения энергоэффективности электрических приводов на базе асинхронных двигателей с совмещенными обмотками / Д. А. Дуюнов [и др.] // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2017. № 2. С. 11–17.
9. Базовый курс. Задачи моделирования электрических машин в ANSYS Maxwell 2D/3D: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cae-expert.ru/education/bazovyy-kurszadachi-modelirovaniya-elektricheskikh-mashin-v-ansys-maxwell>
10. Морозов К. Новый асинхронный двигатель для транспорта. *ProТранспорт*, 2014. № 5. С. 46–47.
11. Дейнего В. Н. Дуюнов Д. А., Иванов В. Ф. Изменение обмоток асинхронных электродвигателей – потенциал обеспечения надежности электросетей. *Электротехника. Передача и распределение*, 2015. № 2(29). С. 42–49.
12. Васильев В. А., Калмыкова М. А. Анализ и выбор программных продуктов для решения инженерных задач приборостроения. *Современная техника и технологии*, 2013. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://technology.snauka.ru/2013/03/>.
13. Глухов Д. М., Воронков И. С. Программно-вычислительный комплекс для проектирования энергоэффективных многофазных асинхронных двигателей. *Сборник статей пользователей ELCUT*. 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://elcut.ru/publications/publications_index.php.
14. Хип Б., Орлов Ю. Создание высокоточной модели электродвигателя для проектирования системы управле-

ния и верификации. *Современная электроника*. № 3. 2015. С. 78-81.

15. Муравлев О. П., Муравлева О. О. Теория точности и ее использование для ресурсосбережения при проектировании и изготовлении электрических машин. *Известия Томского политехнического университета*. 2003. Т.306. №1. С 152-157.

16. Мачулин П. С. Современные проблемы разработки электропривода. *Молодой ученый*, 2016. №10. С. 273-275.

References

1. Daleka V. (2005). The scientific principles resource saving when exploitation of urban electrictransport: abstract. dis. ... d-RA tekhn. science: 05.13.22; National transport University, 40 p.
2. Lyutarevich A., Dolinger S., Chepurko N. (2014). Questions of designing DC motors with high-coercivity magnets. *Modern problems of science and education*. 5.
3. Grigoriev O., Evdokimov S., Masyutin S., and others. (2003). Design and manufacture of electric motors on an individual order. *CAD and graphics*. 3.
4. Usynin Y., Sychev D., Savosteenko N. (2017) Energy Saving in Pilger Mill Electric Drives Complete Solution. *In International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 8(4). P. 1673 – 1681.
5. Jauregui-becker J., Mulder W. (2013). Work in Progress: Developing Tools that Support the Design of Easily Maintainable Rolling Stock. *Procedia CIRP*. P. 204-206.
6. Zebardast A., Mokhtari H. (2008). Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving. *Conference: Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*.
7. Muravleva O. (2005). Energy-Efficient asynchronous motors for regulated electric drive. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University*, 308. 7. P. 135-139.
8. Development of a method for improving the energy efficiency of electric drives based on asynchronous motors with combined windings (2017). / D. Duunov [et al.] / *Defense complex – scientific and technical progress of Russia*. 2. P. 11-17.
9. Basic course. Tasks of modeling electric machines in ANSYS Maxwell 2D / 3D: [Electronic resource]. – Mode of access: <http://cae-expert.ru/education/bazovyy-kurszadachi-modelirovaniya-elektricheskikh-mashin>.
10. Morozov K. (2014). New asynchronous motor for transport. *Rgotransport*. No. 5. P. 46-47.
11. Deynego V., Duyunov D., Ivanov V. (2015). Changing the windings of asynchronous electric motors-the potential for ensuring the reliability of power grids. *Transmission and distribution*. 2(29), P. 42-49.
12. Vasiliev V., Kalmykova M. (2013). Analysis and selection of software products for solving engineering problems of instrumentation. *Modern equipment and technologies*. 3. [Electronic resource]. URL: <http://technology.snauka.ru/2013/03/>.
13. Glukhov D., Voronkov I. (2015). Software and computing complex for designing energy-efficient multiphase asynchronous motors. *Collection of articles by ELCUT users*. [Electronic resource]. URL: https://elcut.ru/publications/publications_index.php.
14. Hip B., Orlov Yu. (2015). Creating a high-precision model of an electric motor for control system design

and verification. Modern electronics, no. 3, , P. 78-81.

15. Muravlev O., Muravleva O. (2003). Accuracy. Theory and its use for resource saving in the design and manufacture of electrical machines. Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Vol. 306. No. 1. P. 152-157.

16. Machulin P. (2016) Modern problems of electric drive development. Young scientist. 10, P. 273-275.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Т. Доманський, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна

Автор: ДАЛЕКА Василь Хомич
доктор технічних наук., професор
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – dalekavf@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3074-5500>

Автор: КУЛЬБАШНА Надія Іванівна
кандидат технічних наук., старший викладач
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – kulbakanadia810@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1551-1500>

Автор: КУЗНЕЦОВ Анатолій Іванович
кандидат технічних наук., доцент
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – kai@kname.edu.ua

INFORMATION TECHNOLOGIES IN IMPROVING ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC MACHINES

V. Daleka, N. Kulbashna, A. Kuznetsov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The article provides results of research and suggestions for increasing energy efficiency of electric machines based of informational technologies in programming environment “КОМПАС-3D”.

The article shows the relevance of resource saving for transport field where material, energetic, financial and human resources are being extensively used. Also, according to the statistical data almost 95% of electricity used by enterprises are being used to power transportation itself, hence power is used solemnly by electric vehicles – traction engines and auxiliary engines.

Based on the analysis of research and their publications methods of increasing electric machines' energy efficiency were discovered. Usage of methodology of designing and manufacturing electric machines based on CAD/CAM systems gives ability to forecast their energy efficiency and solve a problem of resource storage, quality and competitiveness. Development of resource-efficient electric engine is a process of finding optimal parameters or structure. A choice of optimal engine structure lies in choosing design of each individual element, quantity of elements and relations between them, in defining spatial distribution of the elements. Built-in parameters of engine make it possible to conduct further development without using of mathematical apparatus, manufacturing engines of different configurations and calculation of technical and economical indicators, which evaluate efficiency of given solutions.

On the example of the traction motor of the trolleybus the dependences of SEC on its geometrical parameters, properties of magnetic materials, power of the vehicle, and also speed of movement of the vehicle are resulted. The expediency of solving resource saving issues during the whole design process is shown.

Keywords: resource saving, information technologies, energy efficiency, electric motor, computer-aided design systems, efficiency coefficient.