

## ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ «ПАЛИВНИЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР – ЕЛЕКТРОДВИГУН» В САПР

Становський О. Л., Швець П. С., Бондаренко В. В., Науменко Є. О., Хуссain Валід Шер, Добровольська В. В.

### 1. Вступ

Існує багато застосувань електричної рушійної сили, де з різних причин покупні асинхронні двигуни не задовольняють завданням на проектування об'єкта в цілому. Це пов'язано із електромеханічними характеристиками (наприклад, у транспортних двигунів, двигунів ескалаторів, приладів, тощо), або з неоптимальністю енергетичних витрат (наприклад, в системах «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун»). Ця обставина ускладнює існуючі або створює нові, «нетипові» обмеження при оптимізації таких систем в САПР.

Крім того, в багатьох випадках енергетичні показники окремих підсистем, що містять електродвигун, не можуть бути розглянуті незалежно. Тому удосконалення існуючих та створення нових методів і моделей, призначених для підвищення ефективності автоматизованого проектування систем типу «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун», є вельми актуальним завданням.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

*Об'єкт дослідження* – це процес автоматизованого проектування складного електротехнічного обладнання по глобальній зв'язності між параметрами його елементів [1–3].

*Технологічний аудит* в САПР – це перевірка технологічних процесів, методів, прийомів і процедур, що використовуються в процесі автоматизованого проектування, наприклад, складного електротехнічного обладнання, з метою оцінки їх продуктивності та ефективності.

Технологічний аудит об'єкта дослідження дозволив встановити, що існуючі методи автоматизованого проектування асинхронних електродвигунів не здатні ефективно отримувати оптимальні параметри останніх. Це пов'язано з тим, що їхні енергетичні показники не можуть бути розглянуті незалежно від відповідних показників джерела електричної енергії. Із цього випливає, що технологію проектування таких двигунів необхідно змінити таким чином, щоб в якості предмета проектування розглядався комплексний агрегат типу «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун».

Іншим висновком технологічного аудиту САПР асинхронних електродвигунів є необхідність зміни методів, прийомів і процедур проектування, в яких теоретичне та реальне ковшання електродвигуна розглядаються окремо.

### 3. Мета та задачі дослідження

*Мета дослідження* – зменшення термінів підготовки виробництва і підвищення якості продукції машинобудівних підприємств на етапі автоматизованого проектування складного електротехнічного обладнання. Ці показники необхідно досягти шляхом розробки та впровадження методів і моделей для оптимізації глобальних зв'язків в САПР.

Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі задачі.

1. Розробити метод оптимізації в САПР систем типу «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун», енергетичні показники яких не можуть бути в процесі автоматизованого проектування розглянуті незалежно.

2. Розробити САПР електротехнічного обладнання «OPTIGLOC» та здійснити її виробниче випробування і оцінку техніко-економічний ефекту її застосування.

#### 4. Исследование существующих решений проблемы

Асинхронні електродвигуни зустрічаються в найрізноманітніших галузях машинобудування, транспорту, приладобудування, побутової техніки та багато іншого [4–6]. Але, незважаючи на це, наукове та практичне вдосконалення напрямків проектування «звичайних» асинхронних електродвигунів в останній час є процесом вкрай рідким. Адже наразі існують стабільні (хоча й вельми складні!) методи розрахунків [7, 8] та, головне, велика лінійка таких електродвигунів у продажу. Останнє зводить проектування двигуна до вибору з переліку існуючих покупних [9, 10].

Натомість, напрямки та методи стратегічного розвитку автономного електрообладнання створюють вимоги та умови для нових підходів при автоматизованому проектуванні спеціальних асинхронних двигунів [11, 12]. До цих систем відноситься також система «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун», головна прикмета якої – наявність обмежень на параметри, які «належать» одночасно різним підсистемам останніх [13, 14].

Прикладом такого обмеження, яке має найсуттєвіший вплив практично на всі експлуатаційні характеристики двигунів, є реальне поточне електричне ковзання:

$$s=(f_1-f_2)/f_1,$$

яке пов'язує параметри різних матеріальних субстанцій (поле і фізичний об'єкт), що належать до різних підсистем системи «генератор – двигун»:

$f_1$  – частота обертання магнітного поля статора;

$f_2$  – частота обертання ротора двигуна.

У випадку системи «паливний генератор – асинхронний двигун» із близькими значеннями потужності підсистем *обидва* ці параметри, а отже і ковзання, суттєво залежать від моменту на валу АД  $M$ :  $f_1(M)$ ,  $f_2(M)$  та  $s(M)$ .

Взагалі, під терміном «ковзання» розуміють два, суттєво різні з точки зору проектувальника параметри. По-перше, це реальне, *миттєве ковзання* як функція навантаження двигуна, а отже, часу, і, по-друге, *номінальне ковзання*, як число, яке береться до уваги при проектних розрахунках. Саме тому, номінальне ковзання при типових розрахунках окремих електродвигунів або «вибирається з таблиць», або просто перевіряється на «прийнятне значення», що, зрештою, не сприяє створенню оптимальних конструкцій [15].

З іншого боку, дуалізм ковзання створює широкі можливості для САПР в тому випадку, коли об'єктом проектування є не окремий електродвигун, а система «генератор – електродвигун». Як правило, потужності елементів таких систем сумірні, а отже, змінні, що входять до ковзання, тісно взаємодіють. В цих

умовах ковзання, завдяки також широкій, – *глобальній* зв'язності із багатьма іншими параметрами згаданої системи, може бути розглянуте вже не як деяке обмеження, а важлива проміжна цільова функція проектування.

Завдяки цим особливостям, ковзання стоїть окремо серед проєктованих параметрів, адже один з його аргументів, – частота електричного струму живлення, – не завжди доступна для проєктувальника в якості аргументу. За винятком того випадку, коли частота виступає в якості керуючого впливу на швидкість обертання двигуна [16].

В будь-якому випадку частота нормально працюючого генератора, як правило, піддається постійному моніторингу з метою захисту від різноманітних змін, пов'язаних із умовами експлуатації відповідних електротехнічних систем.

*Захист від пониження частоти.* Зниження частоти відбувається в результаті нестачі генерованої потужності в мережі [17].

*Захист від підвищення частоти.* Функція захисту від підвищення частоти використовується у всіх випадках, коли необхідно надійне виявлення високого значення основної частоти енергосистеми. Підвищення частоти відбувається у разі раптового скидання навантаження або при багатофазних коротких замиканнях в енергосистемі.

*Захист по швидкості зміни частоти.* Функція захисту за швидкістю зміни частоти дозволяє розпізнавати на початковій стадії системні аварії. Вона може використовуватися для зменшення потужності генерованої електроенергії і в схемах коригуючого впливу. Функція здатна виявляти як позитивну, так і негативну зміну частоти.

*Частотний захист з накопиченням часу.* Частотний захист з накопиченням часу використовує вимірювання частоти системи і лічильники часу.

Функція, яка використовується для захисту генератора, видає сигнал пуску при досягненні частотою або напругою певних меж. Межа частоти визначається, знижуванням останньої в заданому частотному діапазоні, а напруга прямої послідовності – в межах заданого діапазону по напрузі.

Сигнал пуску запускає окремий таймер подій, який відраховує час знаходження частоти в межах заданого діапазону, а також накопичувальний таймер, що відлічує сумарний час знаходження частоти в межах заданого діапазону. При досягненні таймерами своїх граничних значень видається сигнал тривоги або відключення для захисту генератора від ненормального режиму частоти [18].

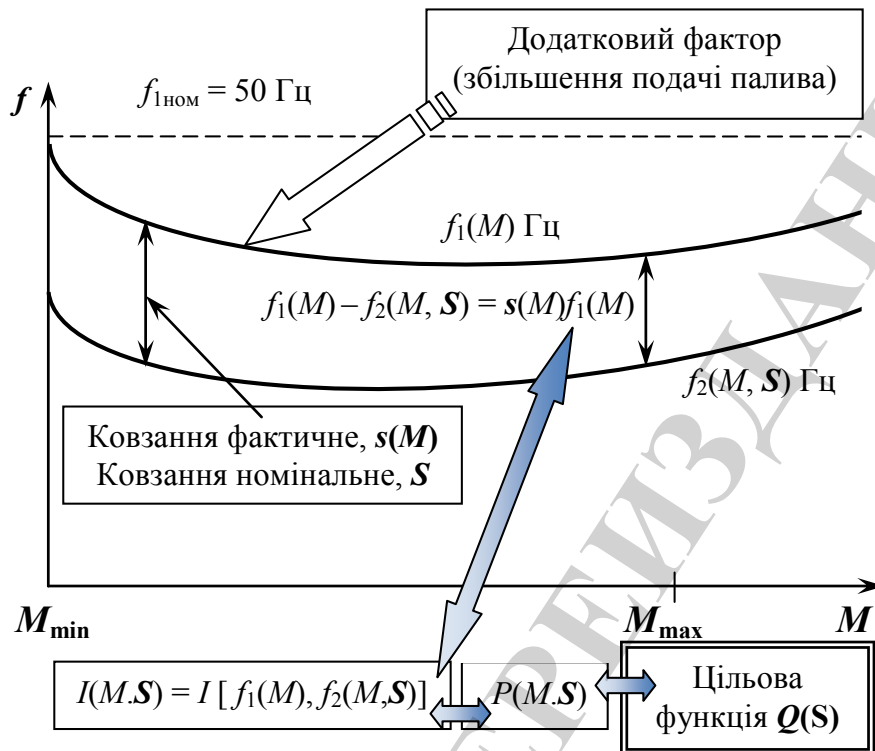
## **5. Методи дослідження**

### **5.1. Розрахунок параметрів складного електротехнічного обладнання за глобальною зв'язністю**

Розглянемо випадок, коли асинхронний двигун працює від паливного електрогенератора сумірної з ним потужності.

Коли значення моменту на валу  $M$  невелике, величина частоти обертання магнітного поля статора  $f_1$ , навіть при генераторі сумірної із двигуном потужності, наближається до номінального значення 50 Гц. При цьому частота обертання ротора  $f_2$  визначається фактичним ковзанням  $s(M)$  (рис. 1). Із збільшен-

ням моменту  $M$  обидві частоти зменшуються, а ковзання  $s(M)$ , яке є функцією цих частот, незначно змінюється.



**Рис. 1.** Схема до розрахунку параметрів системи «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун» за фактичним та номінальним ковзанням

Але ковзання *одночасно* є *розрахунковою* характеристикою в САПР АД.

Адже при розрахунку асинхронних двигунів також використовується параметр «ковзання», який задається або обирається проектувальником в якості сталого числа (так зване номінальне ковзання  $S$ ). Під час проектування параметр  $S$  є аргументом для обчислення багатьох характеристик двигуна. Він також визначає фактичне ковзання останнього  $s(M)$ , струм  $I(M, S) = I[f_1(M), f_2(M, S)]$ , який споживає двигун від джерела, і далі по ланцюжку: фактична потужність  $P(M, S)$  і, нарешті, витрату пального в електрогенераторі  $Q(S)$ .

Із зазначеного випливає, що під час проектування розрахункове (номінальне) значення ковзання  $S$  – суть число, а фактичне ковзання  $s$  – функція режиму роботи АД. Тому в роботі реалізовано такий метод «оберненого» розрахунку ковзання  $S$ , якому передуює «прямий» розрахунок функції  $s(M)$  (рис. 1). На рис. 1 позначені також обидва види ковзання: фактичне (поточне)  $s$  та номінальне  $S$ .

Відмітимо, що криві на рис. 1 мають явно виражений мінімум. Це відповідає такому режиму роботи системи, коли деякий «додатковий фактор» всякий раз розганяє потужність роботи генератора при критичному зменшенні частоти обертання магнітного поля статора  $f_1$ .

При живленні двигуна від паливного електрогенератора таким додатковим фактором є підвищення витрати палива при неприпустимому зменшенні частоти струму джерела. При цьому значення  $f_1$  відновлюється, а витрата палива  $Q$  в генераторі – збільшується.

## 5.2. Метод оптимізації в САПР систем типу «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун»

Запропонована схема розрахунку параметрів (рис. 1) покладена в основу методу оптимізації системи «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун». Послідовність операцій методу при використанні в якості глобального зв'язку ковзання наведена на рис. 2.



Рис. 2. Послідовність операцій при розрахунку ковзання  $S$  в САПР системи «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун»

Спочатку відбувається вибір проміжної цільової функції оптимізації, далі – виявлення усіх враховуваних в САПР зв'язків між аргументами системи, і, нарешті, вибір глобального зв'язку.

Далі будуються залежності  $f_1(M)$  та  $f_2(M, S)$  та визначаються функції  $I(M, S)$  та  $P(M, S)$ . Інтегруючи останню, отримуємо цільову функцію – витрату палива  $Q(S)$  в генераторі.

Оптимізація в рамках запропонованого методу полягає у підборі такого номінального значення  $S$ , при якому інтегральна витрата палива  $Q$  в генераторі буде мінімальною. В будь-якому випадку, маючи «пряму» залежність  $Q(S)$ , можна розв'язувати обернену задачу оптимізації: пошук такого номінального значення ковзання  $S^*$ , яке (в заданих межах) гарантує не перевищення заданої витрати палива  $Q^*$ . Така задача по суті є згаданим вище завданням оптимізації із зв'язаними аргументами, оскільки ковзання  $S$  є функцією слабкозв'язаних між собою моментів  $M_{\min}$  та  $M_{\max}$ .

## 6. Результати дослідження

Загальна структура розробленої САПР «OPTIGLOC» наведена на рис. 3.

Структура на рис. 3 містить блоки введення вихідних даних і класифікації поставленого в цих даних завдання з точки зору виду проектування:

- об'єкт, що містить електродвигун;
- проектування по «стандартній» схемі з вибором величини ковзання;
- проектування за новою схемою з визначенням ковзання за допомогою оптимізаційних розрахунків.

Далі виконується попередній розрахунок асинхронного двигуна «до ковзання», вибір або розрахунок ковзання і остаточний розрахунок, після якого проектування закінчується.

Серед об'єктів проектування існують такі, які по одному або декількох параметрах можна віднести до «об'єктів відповідального призначення». Прикладом таких об'єктів може бути відповідальне електрообладнання, складовими якого є, зокрема, унікальні електродвигуни, лінії електропередач (ЛЕП) та ін.

Перший додатковий блок запускається саме в тих випадках, коли з технічного завдання на проектування виходить, що необхідно створювати двигун відповідального призначення. Під цим розуміють, що останній передбачається використовувати в несприятливому середовищі зі значними можливостями ризикових загроз його працездатності.

Другий додатковий блок призначений для проектування електродвигунів, які призначені для роботи в мережі, частково недоступній для моніторингу. Це породжує задачу забезпечення таких електродвигунів інтелектуальним блоком, в завдання якого входить визначення несправностей в мережі і підтримка прийняття рішення щодо їх усунення.

Експериментальний блок САПР «OPTIGLOC» створений для виготовлення дослідного зразка проектованого варіанта електродвигуна і випробування його на лабораторному стенді. Стенд дозволяє оцінювати тепловий стан вузлів двигуна за допомогою відображення і комп'ютерної обробки інфрачервоного випромінювання від його поверхні. Також можливі вимірювання швидкості обертання валу асинхронного електродвигуна, механічного моменту на ньому, ковзання і витрати пального в бензиновому генераторі [19, 20].

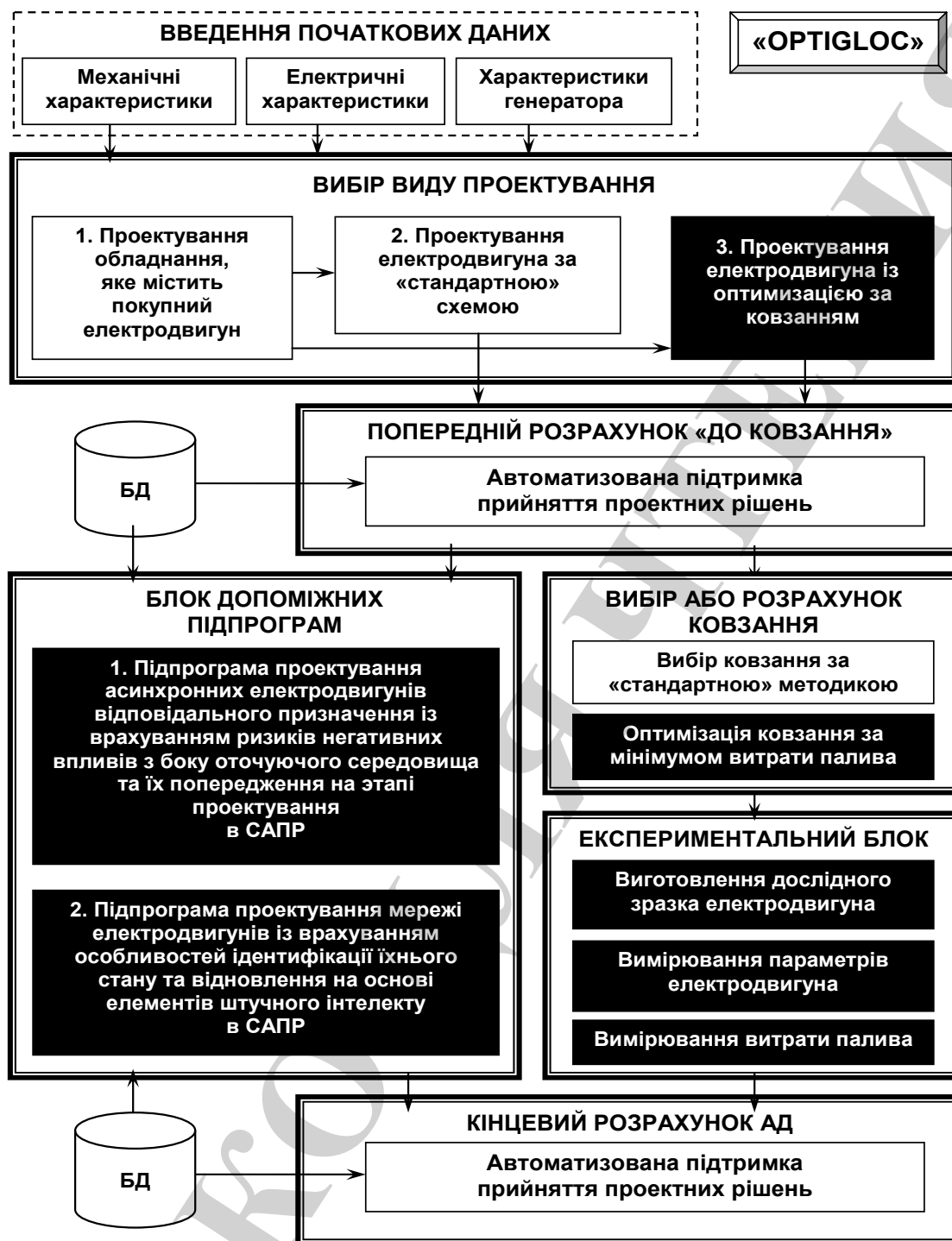


Рис. 3. Структура та головні підсистеми САПР «OPTIGLOC»

Розглянемо приклад лабораторної оптимізації системи «бензиновий генератор – двигун» з допомогою САПР «OPTIGLOC». До системи «паливний (бензиновий) генератор – асинхронний електродвигун» входив покупний генератор моделі «Champion GG3300» (Китай) і проєктований електродвигун.

Потужності генератора, що працює в «штатному» режимі достатньо для підтримання роботи електродвигуна, при цьому, «штатна» витрата палива становить 1,5 л/год або 0,23 кг/кВт·год.

Як сказано вище, навантаження на систему, як правило, нестабільне. При його різкому зростанні падає частота струму на виході генератора, що призво-

дить до форсування його потужності і, як наслідок, автоматичного відновлення частоти до дозволеного рівня на виході. Відповідно, підвищується витрата бензину в генераторі.

Режим зміни витрати палива залежить від обраного при проектуванні електродвигуна значення ковзання  $S$ . Експеримент показав, що залежність витрати палива від закладеної в проект величини ковзання має мінімум, пошук якого і був оптимізаційним завданням.

Далі виконується попередній розрахунок асинхронного двигуна «до ковзання», вибір або розрахунок ковзання і остаточний розрахунок, після якого проектування закінчується.

Теоретично доведено і практично, за допомогою комп'ютерного експерименту і виробничих випробувань підтверджена можливість підвищення ефективності проектування та якості продукції електротехнічного виробництва. В основі цього – використання САПР, яка забезпечує ефективну оптимізацію параметрів складного електротехнічного обладнання за глобальною зв'язністю – ковзанням.

В Одеському ПП «Спеціалізоване енергетичне підприємство «ЕнергоКОМ» (Україна) було проведено випробування САПР електротехнічного обладнання «OPTIGLOC», яка базується на запропонованих моделях і методах. В якості об'єкта автоматизованого проектування використовували систему «Дизельний генератор – асинхронний двигун змінного струму». В результаті випробувань встановлено, що використання САПР «OPTIGLOC» дозволило зменшити питому витрату палива в генераторі на 5,3 %. При цьому термін служби системи та стабільність виконання нею технічних завдань не змінюються, а терміни проектування знижуються, в середньому, на 13,7 %.

## **7. SWOT-аналіз результатів дослідження**

*Strengths.* Головною позитивною дією об'єкта дослідження на свої внутрішні фактори є створена ним можливість використання двох автономних понять «ковзання». Перше, розрахункове, – суть число, яке характеризує конструкцію асинхронного двигуна, та друге – фактичне, як змінна, що характеризує поточний електромеханічний режим його роботи. У порівнянні із аналогами запропонований підхід дозволяє оптимізувати масу двигуна, зменшуючи часові витрати на його проектування.

*Weaknesses.* Головною негативною дією об'єкта дослідження на свої внутрішні фактори є необхідність постійно використовувати експериментальне забезпечення, що виносить процес проектування в САПР електрообладнання за межі чисто комп'ютерних лабораторій. Це призводить до деякого збільшення енерговитрат та витрат на додаткові трудові ресурси.

*Opportunities.* Перспективи подальших досліджень в цьому напрямку пов'язані як з розвитком теоретичної бази (наприклад, методів оптимізації складних систем), так і з удосконаленням методів і засобів підвищення ефективності автоматизованого проектування.

При подальшому впровадженні нового методу розрахунку асинхронних електродвигунів додаткові можливості очікуються, в першу чергу, від розши-



рення можливостей та областей застосування енергосистем із автономним живленням.

*Threats.* Як і в будь-якій САПР, побудованій на прогнозних моделях, загрози її ефективності впливають із «прокляття проектування». Ця обставина полягає в принциповій неможливості точного передбачення відповідності проекту технічному завданню на проєктований об'єкт до того, як цей об'єкт буде виготовлено та випробувано.

## 8. Висновки

1. Розроблено метод оптимізації в САПР систем типу «паливний електрогенератор – асинхронний електродвигун», енергетичні показники яких не можуть бути в процесі автоматизованого проектування розглянуті незалежно. Метод базується на тому, що відносна близькість потужностей генератора та електродвигуна, з одного боку, створює необхідність одночасного врахування параметрів обох підсистем під час оптимального проектування останнього. З іншого боку, дозволяє виконувати таке проектування більш ефективно. Підвищення ефективності проектування створюється за рахунок використання в якості цільової функції оптимізації номінального ковзання асинхронного двигуна. Розрахунок номінального ковзання спирається на експериментальне вимірювання фактичного ковзання, яке, в свою чергу, пов'язане із цільовою функцією – витратою палива в генераторі.

2. В Одеському ПП «Спеціалізоване енергетичне підприємство «ЕнергоКОМ» (Україна) було проведено випробування САПР електротехнічного обладнання «OPTIGLOC», яка базується на запропонованих моделях і методах. В результаті випробувань встановлено, що використання САПР «OPTIGLOC» дозволило зменшити питому витрату палива в генераторі на 5,3 %. При цьому термін служби системи та стабільність виконання нею технічних завдань не змінюються, а терміни проектування знижуються, в середньому, на 13,7 %.

## Література

1. Stanovskyi, O. Connectivity optimization of the elements in the tasks of computer-aided system design [Text] / O. Stanovskyi, P. Shvets, A. Toropenko, V. Bondarenko, S. O. Abu, O. Krasnozhan, A. Stanovskyi // Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»: Mechanical-technological systems and complexes. – 2015. – № 49. – P. 170–175.

2. Stanovskyi, O. Mathematical modeling and optimization of complex systems on a global connection parameters in CAD [Text] / O. Stanovskyi, P. Shvets, V. Bondarenko, A. Toropenko, S. O. Abu, W. Hussain // Materials of IX Annual Scientific Conference «Information Technology and Automation – 2016». – Odessa, 2016. – P. 8–9.

3. Stanovskyi, O. SAPR elektrotehnicheskogo oborudovaniia so slabosviazannymi elementami [Text] / O. Stanovskyi, P. Shvets, A. Toropenko // Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni. – 2013. – Vol. 8. – P. 133–143.

4. Induction (Asynchronous) Motors [Electronic resource] // Mississippi State University Dept of Electrical and Computer Engineering, Course ECE 3183, 'Electrical Engineering Systems for non-ECE majors'. – December 2, 2012. – Available at:

\www/URL: [http://www.pssurvival.com/PS/Motors/Induction\\_Motor-2017.pdf](http://www.pssurvival.com/PS/Motors/Induction_Motor-2017.pdf)

5. Wheel asynchronous traction motor with external rotor [Text] // Neudorfer. Glasers Annalen. – 2001. – № 6/7. – P. 237–242.

6. Stallcup, J. G. Stallcup's® Generator, Transformer, Motor and Compressor [Text] / J. G. Stallcup, J. W. Stallcup. – Jones & Bartlett, 2011. – 392 p.

7. Goldberg, O. D. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Text] / O. D. Goldberg, Ya. S. Gurin, I. S. Sviridenko. – Moscow: Vysshaya shkola, 2001. – 431 p.

8. Silin, L. F. Proektirovanie asinhronnykh dvigatelei [Text] / L. F. Silin. – Krasnoyarsk: IPTs KGTU, 2002. – 236 p.

9. Ozyurt, C. H. Parameter and Speed Estimation of Induction Motors from Manufacturers Data and Measurements [Text] / C. H. Ozyurt. – Middle East Technical University, 2005. – 156 p.

10. Say, M. G. Units, Mathematics and Physical Quantities [Text] / M. G. Say, M. A. Laughton // Electrical Engineer's Reference Book. – Elsevier, 2003. – P. 1–32. doi:10.1016/b978-075064637-6/50001-0

11. Yeadon, W. Handbook of Small Electric Motors [Text] / W. Yeadon, A. Yeadon. – McGraw-Hill, 2001. – 1040 p.

12. Islam, R. Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction [Text] / R. Islam, I. Husain, A. Fardoun, K. McLaughlin // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2009. – Vol. 45, № 1. – P. 152–160. doi:10.1109/tia.2008.2009653

13. Stanovskyi, O. The complex systems parameters mathematical modeling and optimization by global connectivity in CAD [Text] / O. Stanovskyi, P. Shvets, V. Bondarenko, A. Toropenko // ScienceRise. – 2016. – № 9/2 (26). – P. 6–12. doi:10.15587/2313-8416.2016.77768

14. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniia SAPR CAD/CAM/CAE. Ogranicheniia [Electronic resource]. – Available at: \www/URL: <http://sapr-cad.ru/glava-optimizatsiya/ogranicheniya>. – 13.01.2015.

15. Kim, K.-C. The Shape Design of Permanent Magnet for Permanent Magnet Synchronous Motor Considering Partial Demagnetization [Text] / K.-C. Kim, S.-B. Lim, D.-H. Koo, J. Lee // IEEE Transactions on Magnetics. – 2006. – Vol. 42, № 10. – P. 3485–3487. doi:10.1109/tmag.2006.879077

16. Novikov, G. V. Chastotnoe upravlenie asinhronnymi elektrodvigateliami [Text] / G. V. Novikov. – Moscow: MSTU n.a. N. E. Bauman, 2016. – 498 p.

17. Pravila i rekomendatsii po regulirovaniu chastoty i peretokov [Electronic resource]: Protocol of the CIS Electric Power Council № 32 of October 12, 2007. – Available at: \www/URL: [http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/r-n-tpolitics/frequency/specdocs/sto\\_standard/Pravila\\_i\\_rekomendacii\\_po\\_regulirovaniu\\_chastoty\\_i\\_peretokov.pdf](http://so-ups.ru/fileadmin/files/company/r-n-tpolitics/frequency/specdocs/sto_standard/Pravila_i_rekomendacii_po_regulirovaniu_chastoty_i_peretokov.pdf)

18. Ustroistvo zashchity generatora REG670 2.0 [Electronic resource]: Product Guide. – ABB, 2016. – Available at: \www/URL: [https://library.e.abb.com/public/fb4796d866104dd39be0a4df1d165821/1MRK502054-BRU\\_B\\_ru\\_\\_\\_\\_\\_REG670\\_2.0.pdf](https://library.e.abb.com/public/fb4796d866104dd39be0a4df1d165821/1MRK502054-BRU_B_ru_____REG670_2.0.pdf). – 22.07.2016.

19. Device for measuring shaft rotation frequency [Electronic resource]: Patent of Ukraine № 48585 / Nakonechnyi M. P., Ivanchenko O. V. – Appl. № 2001107119;

Filed 19.10.2001; Publ. 15.08.2002, Bull. № 8. – Available at: \www/URL: <http://uapatents.com/3-48585-pristriij-dlya-vimiryuvannya-shvidkosti-obertannya-vala.html>

20. IEEE 112. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators [Electronic resource]. – New York: IEEE, 2004. – Available at: \www/URL: [https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab12/IEEEstd\\_112.pdf](https://engineering.purdue.edu/~dionysis/EE452/Lab12/IEEEstd_112.pdf). doi:10.1109/ieeestd.2004.95394

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ