

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДУ ПАЛИВА І РІВНЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ АВТОНОМНИХ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ З ІСКРОВИМ ЗАПАЛЮВАННЯМ

С.В. Зайченко^{1*}, докт. техн. наук, Р.Д. Кулиш^{2**}

1 – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, Київ, Україна

2 – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: zstefv@gmail.com, venenationhesperus@gmail.com

У роботі представлено новий підхід для визначення енергетичних показників, таких як питомі витрати палива та коефіцієнт енергоефективності електрогенеруючої установки. Сутність нового методу полягає в визначенні миттєвої потужності установки з подальшою обробкою даних шляхом інтегрування. Використання такого методу дає змогу встановити залежність питомих енергетичних показників від рівня навантаження генеруючої установки. Встановлений розподіл дозволяє визначити оптимальні параметри експериментальної установки й витрати за різних рівнів навантаження. Найбільші питомі витрати енергії палива (1189–1297 г/(кВт·х) і 962–1147 г/(кВт·х) спостерігаються у разі найнижчого й найважчого навантаження за різних видів палива. Експериментальні дані підтвердили, що паливо без домішок етанолу дає змогу генерувати більшу кількість електричної енергії, що доцільно використовувати в разі виникненні більших потреб. Бібл. 8, рис. 2, табл. 3.

Ключові слова: локальна система, дизель-генератор, графік навантаження, агрегатор.

Введення. Енергетична стратегія України до 2030 року підтримує курс на раціональну «мінімізацію» енергетики. Зокрема, передбачено суттєве збільшення частки використання поновлюваних джерел енергії та позабалансових енергетичних ресурсів до 57,73 млн. т у.п. на рівні 2030 року порівняно з 15,51 млн. т у.п., використаних у 2005 році (збільшення в 3,72 раза). Прогнозовано зростання виробництва електроенергії електростанціями, що використовуватимуть поновлювані джерела енергії (без урахування виробництва електроенергії на малих ГЕС та на біопаливі за базовим сценарієм) до 50 млн. кВт·год у 2010 р.; 800 – у 2015 р.; 1500 – у 2020 р.; 2000 млн. кВт·год – у 2030 році. Одночасно збільшуватиметься виробництво електроенергії блок-станціями промислової та комунальної енергетики до 9,85 млрд. кВт·год у 2010 р.; 10,8 – у 2015 р.; 11,4 – у 2020 р.; 13,5 млрд. кВт·год – у 2030 році [1, 2]. Аналіз динаміки і структура виробництва електроенергії в Україні за останні два роки (2019–2020) свідчить про постійне зростання долі в генерації автономними станціями електричної енергії в загальному обсязі виробництва електричної енергії з 1 до 2 % (відповідно 2372 і 5357 млн кВт·г).

Така особливість пояснюється розвитком систем автономного електропостачання, які не тільки доповнюють стаціонарні електричні станції, але й здебільшого забезпечують вирішення важливих технічних проблем електропостачання у важкодоступних районах. Автономна енергетика дає змогу споживачеві не залежати від централізованого енергопостачання та його стану, використовувати технологію оптимального для таких умов джерела виробництва енергії SMART GRID [3]. У різних режимах роботи системи енергопостачання електричні генератори зазвичай працюють з навантаженням, меншим номінального. Це пояснюється необхідністю резерву для забезпечення електроенергією різної кількості енергоприймачів. Для коректного аналізу динаміки роботи систем та техніко-економічної оцінки варіантів компоновки нових енергосистем одним із найважливіших параметрів є питомі показники витрат і коефіцієнти енергоефективності генеруючого обладнання та енергоприймачів.

Аналіз ринку автономних джерел енергії, які отримали максимального поширення, свідчить про достатньо вузьку номенклатуру вживаних генераторів [4]. Найбільш поширеним варіантом автономного джерела енергії (більше 50 % одиниць) є бензинові генератори з іскровим запалюванням із синхронним електрогенератором 2,5–3,5 кВт.

Фактична ефективність генераторного агрегату в разі недовантаження залежить від ККД двигуна і ККД синхронного генератора за різних навантажень. Існує низка методів встановлення цих параметрів як для двигунів внутрішнього згорання (ISO 15550:2016), так і для синхронних генераторів (ДСТУ ІЕС 60034-2-1:2019). Проте застосування таких методів для автономних генераторів ускладнено необхідністю дослідження окремих складових об'єкта, двигуна внутрішнього згорання і генератора, що в деяких випадках неможливо з конструктивних причин. Саме тому для полегшення процесу встановлення параметрів енергетичної системи двигун-генератор можна розглядати стан системи в цілому.

Для використання вказаного підходу необхідно модернізувати існуючі методи, провести дослідження автономних електричних установок за різних рівнів навантажень, які в цілому направлені на визначення якісних показників електропостачання в номінальних або близьких до номінальних (перенавантаження) режимах.

Мета роботи. Метою цього дослідження є визначення енергетичних показників автономних електричних генераторів на базі двигунів з іскровим запалюванням у процесі використання найбільш поширених палив.

Матеріали досліджень. Як енергетичні показники, необхідні для моделювання динаміки роботи систем енергопостачання та техніко-економічної оцінки варіантів компоновки нових енергосистем, обрано: питомі витрати палива на генерацію електричної енергії за різного рівня навантаження, г/кВт·г; коефіцієнт корисної дії за різного рівня навантаження.

Як паливо для проведених дослідів використано два види найбільш поширених палив (згідно з ДСТУ 7684:2015): бензин автомобільний А-95 – Евро5; бензин автомобільний А-95 – Евро5 – Е7. Досліди проводились у приміщенні за температури (298 ± 3) К $[(25 \pm 3)$ °С] і відносної вологості (95 ± 3) %. Значення атмосферного тиску знаходилось у діапазоні 755-165 мм рт. ст. (100 658-101 991 Па). За даних умов визначено один із головних реологічних параметрів палива – густину. Так, для А-95 – Евро5 вона склала 735 кг/м³, і для А-95 – Евро5 – Е7 – 757 кг/м³.

Серед широкого асортименту автономних генераторів авторами було приділено увагу генеруючим установкам на базі одноциліндрового бензинового чотиритактного двигуна внутрішнього згорання з об'ємом двигуна 200см³. Технічні характеристики наведено в табл. 1. Більшість генераторів використовує як альтернатор синхронний електрогенератор з автоматичним регулятором напруги (AVR), який містить обмотки ротора і статора. Частота обертання ротора електрогенератора підтримується за допомогою відцентрового регулятора частоти, пов'язаного з карбюратором.

На рис. 1 схематично зображена експериментальна установка та вимірювальні пристрої на ній. Основою експериментальної установки є автономний електричний синхронний генератор – 1 із двигуном іскрового запалювання – 2. Карбюратор двигуна – 3 від'єднано від бака (не зображено) і приєднано до посудини з позначеними на ній поділками – 4. Синхронний генератор 1 приєднано до навантажувача у вигляді рідинного реостата – 5. Вимірювання потужності відбувалося шляхом реєстрації напруги на панелі генератора й струму датчиком Холла – 6. Аналоговий сигнал із датчика струму УНДС НК 16 і датчика напруги на основі індуктивного модуля з трансформатором напруги серії ZMPT101В перетворюється 14-бітовою мікросистемою збору даних m-DAQ12 – 7 із фіксацією на комп'ютері – 8.

У табл. 2 і 3 наведено результати експерименту й обчислені показники енергоефективності за встановленими даними зміни напруги й струму. Корисна робота у вигляді електричної енергії ΔP визначена методом трапецій із попереднім добутком даних напруги й струму:

Таблиця 1

Параметр	Одиниця виміру	Значення
Тип двигуна	-	4-тактний
Кількість циліндрів	шт	1
Модель двигуна	-	H-168
Об'єм двигуна	см ³	196
Потужність двигуна	Вт	4780
Максимальна потужність	Вт	2800
Об'єм паливного бака	м ³	0,015
Вага	кг	53,6

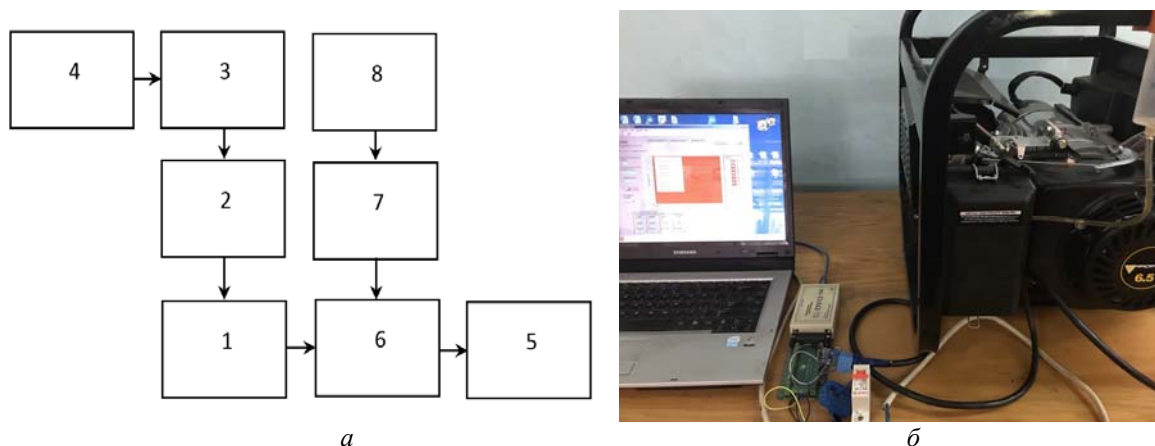


Рис. 1

$$\Delta P = \sum_{k=1}^{N_m} \frac{U_{k-1}I_{k-1} + U_k I_k}{2} \frac{1}{f}, \quad (1)$$

де U_{k-1} , I_{k-1} , U_k , I_k – сусідні значення напруги й струму; f – частота опитування каналів АЦП (1000Hz); N_m – кількість вимірювань:

$$N_m = \Delta t \cdot f. \quad (2)$$

Параметри енергоефективності електрогенератора для бензину А-95 – Євро5 наведено в табл. 2.

Таблиця 2

N_0	$\frac{N}{N_0}$	Δt , s	r , g/s	$BSFC$, g/J	$BSFC$, g/(kW×h)	ΔP , J	η
1	0	97	0,15608	-	-	-	-
2	0,2	89	0,17011	0,00033	1189,21	44828	0,0688
3	0,4	70	0,21629	0,00021	756,00	70693	0,1082
4	0,6	62	0,24419	0,00015	569,03	93320	0,1437
5	0,8	44	0,34409	0,00016	601,36	88843	0,1360
6	1	21	0,68818	0,00026	962,18	55453	0,0850

Параметри енергоефективності електрогенератора для бензину А-95 – Євро5 – Е7 наведено в табл. 3.

Таблиця 3

N_0	$\frac{N}{N_0}$	Δt , s	r , g/s	$BSFC$, g/J	$BSFC$, g/(kW×h)	ΔP , J	η
1	0	92	0,16457	-	-	-	-
2	0,2	84	0,18024	0,00036	1297,71	42011	0,0656
3	0,4	66	0,22939	0,00022	825,81	66509	0,1032
4	0,6	58	0,26103	0,00017	626,48	87265	0,1360
5	0,8	41	0,36927	0,00018	664,68	82779	0,1282
6	1	19	0,79684	0,00031	1147,45	47803	0,0742

Із аналізу даних, наведених в табл. 1 і 2, необхідно визначити зменшення часу роботи електрогенератора Δt і відповідно зростання витрат палива r в середньому на 4,3 %, що пояснюється нижчою теплотворною здатністю спиртовмісних бензинів.

Для полегшення аналізу даних таблиць 1 і 2 побудовано графіки зміни питомої витрати палива й коефіцієнту корисної дії (рис. 3). Суттєві питомі витрати енергії (1189–1297 g/(kW×h) і 962–1147 g/(kW×h)) спостерігаються в разі низького (0,2) і максимального навантаження електрогенератора. За цих обставин наближення навантаження до мінімально-

го значення призводить до значно більших питомих витрат ніж перевантаження електрогенератора. Оптимальний рівень навантаження для електрогенераторів такої конструкції, за якого очікується найнижчий рівень питомих витрат палива, складає 0,7, для різних типів – відповідно 560 і 605 g/(kW×h).

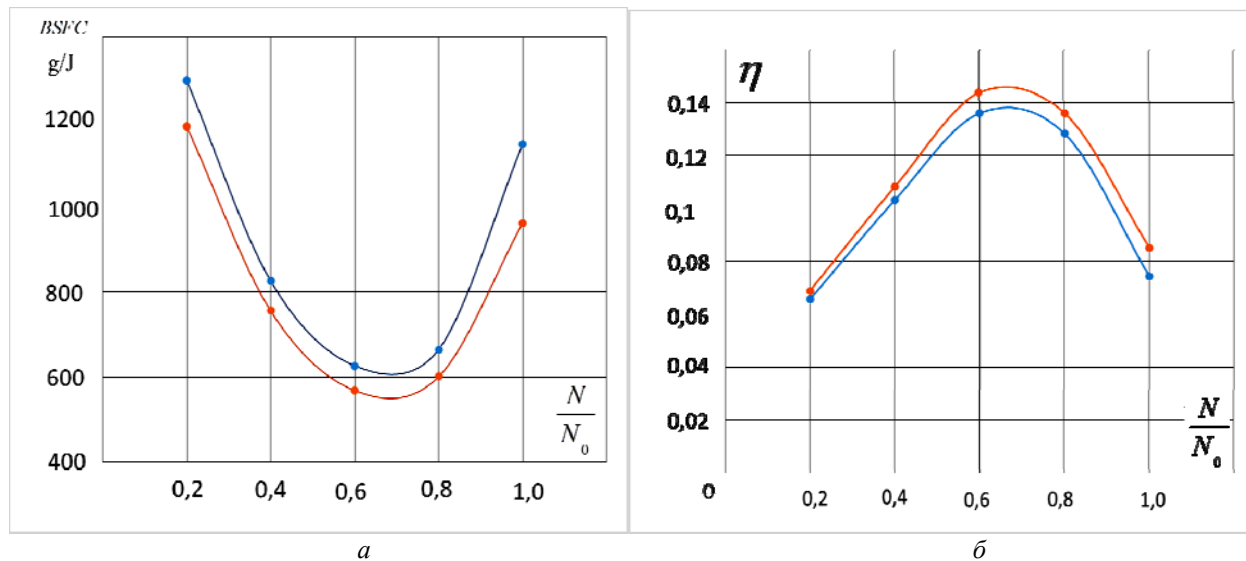


Рис. 2

Діаграми зміни питомої витрати палива (а) і коефіцієнту корисної дії (б) при використанні різних типів палив зображено на рис. 2: ——— – бензин автомобільний А-95 - Евро5; ——— – бензин автомобільний А-95 - Евро5 – Е7.

Причиною таких ефектів є ціла низка негативних явищ, що супроводжують процес генерації електричної енергії в разі відхилення навантаження від оптимального. До основних причин слід віднести: збільшення потужності, погіршення газонаповнення циліндра, зменшення турбулізації з викидом частини заряду з циліндра у вхідну систему за збільшення подачі палива. Також збільшення витрат спостерігається у режимі, наближеному до холостого. До загальних витрат енергії ΔA додаються витрати на створення реактивної потужності, яка необхідна для генерації на різних рівнях навантаження.

Установлені розподіли питомих значень витрат палива і значення коефіцієнту енергоефективності за різного значення навантаження з використанням різних палив за новою методикою вимірювань є необхідними для моделювання й планування енерговитрат енергетичних систем, які використовують генеруючі установки цього типу.

Висновки. У цій роботі було запропоновано нову методику визначення значень витрат палива і значення коефіцієнту енергоефективності електрогенеруючої установки з двома паливами (етил-бензин), що дало змогу відстежувати максимальну ефективність. Так, для такого обладнання вона складає 0,147 та 0,138 за навантаження 0,7 від номінального для різних типів палив. Питомі витрати для оптимального навантаження складають 560 і 605 g/(kW×h) відповідно.

Використання цієї методики, яка базується на визначенні миттєвих значень потужності, за певних умов дає змогу уникнути суттєвих похибок (30 %) під час визначення енергетичних параметрів. Крім того, експериментальна оцінка роботи генеруючої установки підтвердила, що паливо без домішок етанолу дає змогу генерувати більшу кількість електричної енергії, що доцільно використовувати в разі виникнення більших потреб.

1. Білодід В.Д., Таранець К.В. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. № 18. С. 40–47.
2. Ермілов С. Енергетична стратегія України на період до 2030 року: проблемні питання змісту та реалізації. *Дзеркало тижня*. 2006. № 20. С. 12.
3. Denysiuk S., Zaichenko S., Opryshko V., & Derevianko D. Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. *Eureka: Physics and Engineering*. 2021. No 2. Pp. 19–31.

4. Zaichenko S., Shevchuk S., Opryshko V., Pryadko S., Halem A., Adjebi A. Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine. In 2020 *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. Pp. 305–308.
5. Zaichenko S., Shevchuk S., Opryshko V., Pryadko S., Halem A. Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control. In 2020 *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. Pp. 262–265.
6. Irimescu A., Vasiiu G., Tordai G. T. Performance and emissions of a small scale generator powered by a spark ignition engine with adaptive fuel injection control. *Applied energy*. 2014. No 121. Pp.196–206.
7. Rebai Mohamed, et al. Low-Emission Maximum-Efficiency Tracking of an Intelligent Bi-Fuel Hydrogen–Gasoline Generator for HEV Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.10. 2018. Pp. 9303–9311.
8. Onishchenko D.O., Pankratov S.A., Zotov A.A., Osipkov A.S., Poshekhonov R.A. Study of influence of hydraulic thermoelectric generator resistance on gasoline engine efficiency. *International journal of applied engineering research*. 2017. No 12(5). Pp. 721–727.

OPTIMIZATION OF ELECTRICAL LOAD SCHEDULES BY AN AGGREGATOR IN LOCAL ELECTRICAL POWER SYSTEMS

S. Zaichenko¹, R. Kulish²

1 – National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteiskyi ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

2 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Beresteiskyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: zstefv@gmail.com, venenationhesperus@gmail.com

This proceeding presents a new approach to determining energy indicators, such as specific fuel consumption and the energy efficiency ratio of a power generating plant. The essence of the new method is to determine the instantaneous power of the installation followed by data processing through integration. The use of this method made it possible to establish the dependence of specific energy indicators on the load level of the generating plant. The established distribution allows you to determine the optimal parameters of the experimental installation and consumption at different load levels. The highest specific fuel energy consumption is observed (1189–1297 g/(kW×h) and 962–1147 g/(kW×h)) at the lowest and heaviest load with different types of fuel. Experimental data confirmed that fuel without ethanol impurities allows generating a larger amount of electrical energy, which is advisable to use when greater needs arise. Bibl 8, fig. 2, tables 3.

Keywords: local system, diesel generator, load schedule, aggregator.

1. Bilodid V.D., Taranets K.V. Small energy and its importance in regional systems of the future. *Problemy zahalnoi enerhetyky*. 2008. No 18. Pp. 40–47. (Ukr)
2. Ermilov S. Energy strategy of Ukraine for the period until 2030: problematic issues of content and implementation. *Dzerkalo tyzhnia*. 2006. No 20. P. 12. (Ukr)
3. Denysiuk S., Zaichenko S., Opryshko V., Derevianko D. (2021) Assessment of consumers power consumption optimization based on demand side management. *Eureka: Physics and Engineering*. 2021. No 2. Pp. 19–31.
4. Zaichenko S., Shevchuk S., Opryshko V., Pryadko S., Halem A., Adjebi A. (2020, October). Determination of autonomous electrical energy source technical condition based on an internal combustion engine. In 2020 *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2020. Pp. 305–308.
5. Zaichenko S., Shevchuk S., Opryshko V., Pryadko S., Halem A. Autonomous electric power source energy efficiency improvement by internal combustion engine gases distribution control. In 2020 *IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2020. Pp. 262–265.
6. Irimescu A., Vasiiu G., Tordai G. T. Performance and emissions of a small scale generator powered by a spark ignition engine with adaptive fuel injection control. *Applied energy*. 2014. No 121. Pp. 196–206.
7. Rebai Mohamed, et al. Low-Emission Maximum-Efficiency Tracking of an Intelligent Bi-Fuel Hydrogen–Gasoline Generator for HEV Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 67.10. 2018. Pp. 9303–9311.
8. Onishchenko D.O., Pankratov S.A., Zotov A.A., Osipkov A.S., Poshekhonov R.A. Study of influence of hydraulic thermoelectric generator resistance on gasoline engine efficiency. *International journal of applied engineering research*. 2017. No 12(5). Pp. 721–727.

Надійшла: 08.06.2023

Прийнята: 10.07.2023

Submitted: 08.06.2023

Accepted: 10.07.2023