

7. Siemens Measuring Devices.
URL: <https://www.siemens.com/global/en/products.html> (accessed 05.03.2025).
8. A. Cherniavskyi, A. Hoienko, “A multi-criteria approach to decision-making on choosing the optimal strategy for implementing the energy-saving potential at Ukrainian dairies” in Proc. 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). – IEEE, 2020. pp. 418–423. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9160061> (accessed 07.03.2025).
9. Kotsar O., Karpenko A. Current Issues of Energy Monitoring at Municipal Facilities. Energy and Automation. 2022. pp. 63–65. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/51317/15993> (accessed 05.03.2025). (Ukr).

УДК 621.313.322-843.6

Тітов Є. О., аспірант, ORCID 0009 0007 8222 7477,
науковий керівник: канд. техн. наук, доцент М. А. Коваленко,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

ВПЛИВ РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ФОРМУ КРИВОЇ НАПРУГИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДИЗЕЛЬ- ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

INFLUENCE OF LOAD MODES ON THE SHAPE OF THE VOLTAGE CURVE OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR OF A DIESEL GENERATING SET

Анотація. У статті досліджується вплив режимів навантаження на форму кривої напруги синхронного генератора дизель-електрогенераторної установки (ДГУ). Аналізуються особливості напруги при різних рівнях навантаження (0 %, 50 %, 100 %), а також робота автоматичного регулятора напруги (AVR). Виявлено, що зміна навантаження впливає на гармонійні спотворення та стабільність електропостачання, що є критично важливим для надійності автономних енергосистем. Запропоновано методiku оцінки стабільності вихідної напруги та рекомендації щодо покращення роботи генераторних систем. Бібл. 4, рис. 6.

Ключові слова: автономні електромеханічні перетворювачі, електрогенеруючі пристрої, експлуатація, енергоефективність, надійність, технічне обслуговування, електропостачання, генераторні системи.

Abstract. The article examines the impact of load modes on the voltage waveform of a synchronous generator in a diesel generating set (DGS). The characteristics of voltage at different load levels (0 %, 50 %, 100 %) and the operation of the automatic voltage regulator (AVR) are analyzed. It was found that load variations affect harmonic distortions and power supply stability, which is crucial for the reliability of autonomous energy systems. A methodology for assessing voltage stability is proposed, along with recommendations for improving generator system performance. Ref. 4, Fig. 6.

Keywords: autonomous electromechanical converters, power generating devices, operation, energy efficiency, reliability, maintenance, power supply, generator systems.

Вступ. Стабільність напруги синхронного генератора ДГУ суттєво залежить від режимів навантаження, що впливає на якість електроживлення. Гармонійні спотворення та нестабільність сигналу можуть призводити до перегріву обладнання, втрат потужності та збоїв у чутливих системах, що є критичним для військових, медичних і промислових застосувань. Наукова новизна дослідження полягає у комплексному аналізі впливу режимів навантаження на форму кривої напруги генератора та визначенні ключових факторів, що спричиняють гармонійні спотворення. Запропоновано методику оцінки стабільності вихідної напруги та ефективності роботи автоматичного регулятора напруги (AVR), що може бути використано для вдосконалення систем керування збудженням і мінімізації негативного впливу гармонік на електроспоживачів.

Метою досліджень є аналіз форми кривої напруги синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при різних рівнях навантаження (0 %, 50 %, 100 %), а також дослідження характеристик вихідного сигналу автоматичного регулятора напруги (AVR) за тих самих умов.

Матеріал і результати досліджень. Несинусоїдальність напруги, зокрема гармонійні спотворення на синхронних генераторах, серйозно впливає на якість електроенергії та роботу обладнання. Ідеальна синусоїдальна форма напруги необхідна для ефективної роботи електричних пристроїв. Відхилення від неї виникають через нелінійні навантаження, конструкцію генератора та умови експлуатації, що призводить до додаткових частотних компонентів у сигналі. Це може спричинити перегрів обладнання, неправильну роботу чутливих пристроїв, збільшення енерговтрат, резонансні явища та погіршення якості електроенергії. Вирішення цієї проблеми є важливим для забезпечення надійної роботи аварійних джерел живлення.

На рис. 1 наведено форму сигналу напруги синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при 0 % навантаження, яке є чисто активним.

В ідеальному випадку напруга без навантаження має бути рівномірною

синусоїдою без різких змін форми. Однак отримана осцилограма демонструє виражену

нерівномірність форми хвилі: піки мають неправильну форму, є залом на фронтах хвилі, а також видно значний рівень вищих гармонік. Аналіз форми



кривої напруги виявив такі характеристики: зміна форми піків синусоїди, заломані фронти хвилі, високочастотні коливання у формі хвилі та нестабільність амплітуди напруги.

На рис. 2 наведено вихідний сигнал автоматичного регулятора напруги (AVR) при 0 % навантаження.

Сигнал складається з позитивних імпульсів, розділених періодами відсутності сигналу, що відповідає напівхвильовому виходу плати AVR SX460, яка використовується для регулювання збудження синхронного генератора.



Рисунок 2. Форма сигналу плати AVR при 0 % навантаження

Напівхвильова форма сигналу є типовою для AVR SX460, оскільки вона використовує тиристорну схему регулювання збудження. Це не є несправністю, а є особливістю конструкції плати. Стабільність амплітуди імпульсів свідчить про ефективну роботу системи регулювання збудження при 0 % навантаженні. Невеликі коливання амплітуди можуть бути пов'язані з нелінійністю елементів схеми AVR або з впливом зовнішніх факторів. Це не є несправністю, а є особливістю конструкції плати. Стабільна амплітуда сигналу та відсутність значних спотворень свідчать про те, що плата AVR працює коректно.

На рис. 3 наведено форму сигналу напруги синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при 50 % навантаження, яке є чисто активним.

Асиметрія та нерівномірність форми хвилі можуть бути спричинені особливостями регулювання збудження та механічними коливаннями обертів привідного двигуна. Осцилограма демонструє частоту 50,8 Гц, що дещо перевищує номінальне значення 50 Гц. Дане відхилення є типовим для дизельгенераторних установок із механічним регулятором обертів паливного насоса високого тиску (ПНВТ). Механічні регулятори не забезпечують абсолютної стабільності обертів двигуна, особливо при зміні навантаження, тому незначні коливання частоти є нормальними.

Рівень напруги залишається в межах номінальних значень, без суттєвих відхилень. Аналіз осцилограми показує, що при 50 % активного навантаження форма сигналу наближається до синусоїди з викривленнями, які можуть бути спричинені особливостями регулювання збудження або механічними флуктуаціями обертів привідного двигуна.

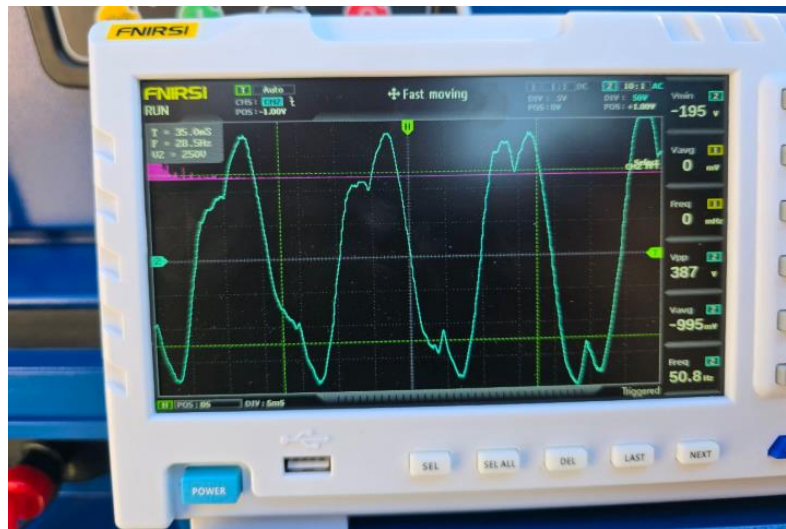


Рисунок 3. Форма кривої напруги синхронного генератора ДГУ при роботі при навантаженні 50 %

На рис. 4 наведено вихідний сигнал автоматичного регулятора напруги (AVR) SX460, який використовується для керування збудженням синхронного генератора дизельгенераторної установки (ДГУ) при 50 % активного навантаження. Ширина та амплітуда імпульсів змінюються відповідно до поточного навантаження генератора, що свідчить про адаптивне регулювання рівня збудження для підтримки стабільної напруги. Частота сигналу становить 51,3 Гц, що є наслідком природних коливань частоти обертання дизельного двигуна під впливом змін навантаження. Відсутність жорсткої стабілізації (як у випадку електронного регулятора обертів) дозволяє короточасні відхилення частоти, що не є критичним для роботи більшості електроспоживачів. За 50 % активного навантаження система автоматично регулює струм збудження, забезпечуючи підтримку стабільної вихідної напруги генератора. У таких умовах AVR формує періодичні імпульси управління збудженням, що видно



Рисунок 4. Форма сигналу плати AVR при 50 % навантаження

на осцилограмі. Відсутність значних спотворень або нестабільності сигналу підтверджує коректну роботу AVR і синхронного генератора.

На рис. 5 наведено форму кривої вихідної напруги синхронного генератора ДГУ при навантаженні 100 % від номінальної потужності, яка має значні спотворення. Хоча плата AVR (наприклад, SX460) працює коректно, ідеальна форма сигналу не підтримується через вплив низки факторів, пов'язаних із роботою генератора та його компонентів.

Осцилограма вихідної напруги ДГУ при 100 % активному навантаженні демонструє значні гармонійні спотворення, які проявляються у вигляді:

- 1.

Нерівномірностей:
Хвиля має нерівні вершини та западини, що вказує на наявність гармонік та інших спотворень.

2. Сплюснення вершин: Вершини хвилі здаються трохи сплюсненими, що може бути пов'язано з нелінійністю навантаження або обмеженнями генератора.

3. Викривлення форми: Загальна форма хвилі відрізняється від ідеальної синусоїди, що свідчить про наявність спотворень.

Причини нерівномірності форми сигналу:

- а) Нестабільність роботи двигуна: Нерівномірність обертання двигуна може призвести до коливань частоти та амплітуди вихідної напруги.

- б) Недосконалість AVR: Автоматичний регулятор напруги (AVR) може не повністю компенсувати зміни навантаження, що призводить до спотворень сигналу.

- в) Механічні вібрації: Механічні вібрації в генераторі можуть впливати на форму сигналу напруги.

- г) Вплив ПНВТ: Механічний паливний насос високого тиску може вносити нерівномірність в роботу двигуна, що відображається на формі вихідного сигналу генератора.

На рис. 6 наведено є значні спотворення форми напруги при повному навантаженні (100 %).

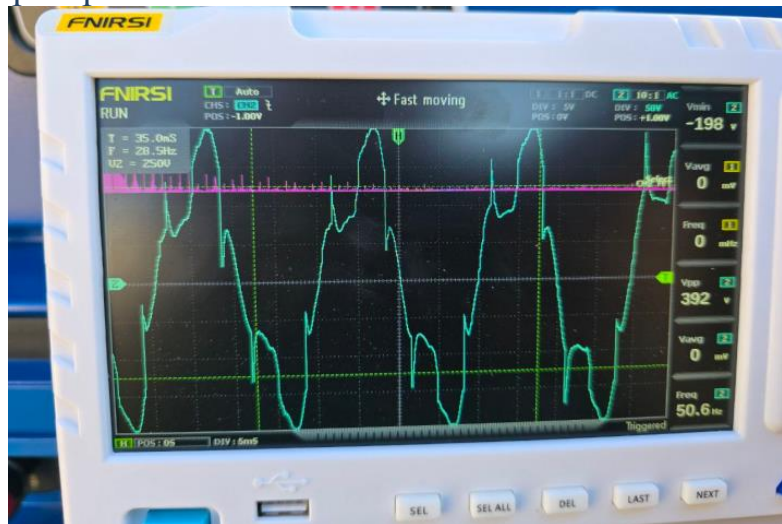


Рисунок 5. Форма кривої напруги синхронного генератора ДГУ при роботі при навантаженні 100 %

Візуальний аналіз осцилограми, отриманої з виходу автоматичного регулятора напруги (AVR) SX460 дизель-генераторної установки при 100 % навантаженні, показує, що замість очікуваного плавного наростання та спаду напруги спостерігаються різкі імпульсні переходи, які мають майже прямокутний характер. Цей феномен є критичним для розуміння динаміки системи.



Рисунок 6. Форма сигналу плати AVR при 100 % навантаження

Ці різкі імпульсні переходи є явним свідченням нестабільності в роботі регулюючої системи або, що ймовірніше, відображають швидке переключення збудження AVR. Таке швидке переключення, ймовірно, зумовлене напівхвильовим тиристорним виходом AVR, який не забезпечує достатньо згладжену зміну вихідної напруги. Напівхвильовий характер вихідного сигналу, властивий тиристорним регуляторам, часто призводить до таких імпульсних перехідних процесів.

На вершинах хвилі, представлених на осцилограмі, чітко видно значні паразитні коливання. Ці коливання можуть бути наслідком кількох факторів, включаючи недостатню фільтрацію вихідного сигналу, або ж вони можуть бути спричинені високочастотними комутаційними процесами, характерними для тиристорного регулятора.

Такі осциляції мають серйозні наслідки, оскільки вони призводять до значних гармонійних спотворень. Це означає, що в напрузі з'являється велика кількість високочастотних складових, які не є бажаними. Ці високочастотні складові можуть викликати перегрів електрообладнання, особливо трансформаторів та двигунів, через збільшення втрат на вихрові струми та гістерезис. Крім того, вони можуть збільшити рівень електромагнітних завад, що може вплинути на роботу чутливих електронних пристроїв, таких як системи управління, комп'ютери та телекомунікаційне обладнання, спричиняючи їх нестабільну роботу або навіть вихід з ладу.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що режим навантаження суттєво впливає на форму вихідної напруги синхронного генератора ДГУ. Виявлено, що при низькому навантаженні спостерігається несинусоїдність форми вихідної напруги через насичення магнітопроводу та нерівномірність роботи системи збудження, тоді як при повному навантаженні відбувається зростання гармонійних спотворень, що може негативно впливати на роботу електроспоживачів.

За результатами дослідження можливо визначити критичні режими роботи генератора та шляхи їх оптимізації. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення систем керування збудженням, зменшення рівня гармонійних спотворень і підвищення енергоефективності автономних електрогенеруючих установок.

Список використаних джерел

1. Головка В. М. Математичне моделювання автономної вітроелектричної установки з магнітоелектричним генератором / В. М. Головка, М. Я. Островерхов, М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Д. В. Ципленков // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2022. – № 5. – С. 74–79. DOI: 10.33271/nvngu/2022-5/074.
2. Чумак В. Стабілізація напруги керованого авто-номного магнітоелектричного генератора з магнітним шунтом та збудженням від постійних магнітів / В. Чумак, В. Баженов, О. Тимошук, М. Коваленко, С. Цивінський, І. Коваленко, І. Ткачук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2020. – № 6(5(114)). – С. 56–62. – ISSN 1729-3774.
3. Островерхов М. Розробка системи керування для зняття максимальної потужності автономної вітроустановки з синхронним магнітоелектричним генератором / М. Островерхов, В. Чумак, М. Коваленко, І. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2022. – № 4(2(118)). – С. 67–78. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263432.
4. IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions // IEEE Std 1459–2010 (Revision of IEEE Std 1459–2000). – 2010. – pp. 1–50.

References

1. Golovko V. M., Ostroverkhov M. Y., Kovalenko M. A., Kovalenko I. Y. and Tsyplenkov D. V. (2022) Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 74–79. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074>. (Ukr).
2. Chumack V., Bazhenov V., Tymoshchuk O., Kovalenko M., Tsyvinskyi S., Kovalenko I. and Tkachuk I. (n.d.). Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(5 (114)), 56–62. (Ukr).
3. Ostroverkhov, M., Chumack, V., Kovalenko, M. and Kovalenko, I. (2022) Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2(118)), 67–78. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432>. (Ukr).
4. IEEE (2010) IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions (IEEE Std 1459–2010). IEEE.