

ISSN 1998-7927(print)

ISSN 2664-6498 (online)

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2026-304-6-153-160>

УДК 621.311.1

ВИПРОБУВАННЯ ВЕНТИЛЬНОЇ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА УСТАНОВКИ ЕГ2500

Стрункін Г.М., Кришталь С.В.

TESTING OF THE VALVE SYSTEM OF THE GENERATOR EXCITATION OF THE EG2500 UNIT

Strunkin H.M., Kryshstal S.V.

У статті проведено комплексне дослідження та аналіз впровадження сучасної системи збудження для газотурбінних електростанцій серії EG2500. Актуальність дослідження зумовлена сучасним станом енергетичного сектору України, який стикається з хронічним дефіцитом електричної потужності в об'єднаній енергосистемі. У статті обґрунтовано, що за таких умов стратегічного значення набуває концепція децентралізації та розвитку об'єктів розподіленої генерації, здатних забезпечити автономність критичної інфраструктури та локальних енерговузлів. Детально розглянуто технічний стан парку мобільних установок EG2500, які є ключовим інструментом маневреної генерації завдяки своїй мобільності та здатності до швидкого пуску. Виявлено критичну проблему, за якою тривала експлуатація цих станцій призвела до глибокого морального та фізичного зношення штатних електромеханічних систем збудження. Старі електромеханічні рішення не забезпечують необхідної точності регулювання напруги та швидкодії в динамічних режимах, що створює ризики аварійних зупинок і здорожує технічне обслуговування через дефіцит запчастин. Центральною темою статті є впровадження та випробування нової цифрової системи вентильного збудження СВГ виробництва ТОВ «Плутон ІС». Описано конструктивну структуру системи, яка складається з шафи тиристорного випрямляча та шафи комутації і захисту. Детально розібрано функціональні можливості мікропроцесорної системи керування, включаючи реалізацію ПІД-закону регулювання, автоматичне форсування збудження, обмеження перевантажень за час-залежними характеристиками та можливість інтеграції в наявні системи автоматичного керування станцій. Особливу увагу приділено методиці експериментального налаштування параметрів регулятора у спеціальному режимі «Пульси». Обґрунтовано та застосовано запропонований ітераційний метод експериментального підбору параметрів, що дозволяє досягти оптимальної форми перехідного процесу без автоколивань. У практичній частині роботи наведено результати випробувань на

реальному об'єкті при різкому накиданні та скиданні навантаження потужністю 1МВт. Порівняльний аналіз показав суттєве покращення показників для перерегулювання напруги статора та часу установаження режиму. Додатково підкреслено економічний та експлуатаційний ефект від впровадження СВГ, зокрема збільшення ресурсу автомата гасіння поля за рахунок переведення випрямляча в інверторний режим при штатних зупинках.

Ключові слова: розподілена генерація, газотурбіна електростанція, система збудження, синхронний генератор, накидання навантаження, перерегулювання.

Вступ. На сучасному етапі розвитку енергетики України критичного значення набуває концепція децентралізації енергосистеми. Хронічний дефіцит електричної потужності в об'єднаній енергосистемі (ОЕС) вимагає оперативного розгортання та ефективного використання об'єктів розподіленої генерації [1]. Це дозволяє забезпечити автономність локальних енерговузлів, підтримати роботу критичної інфраструктури та підвищити загальну гнучкість мережі в умовах нерівномірного споживання [2].

Газотурбінні електростанції виробництва «Мотор Січ» та «Південтрансенерго», м. Запоріжжя - серії EG2500 (ПАЕС-2500) [3, 4] - залишаються одним із найбільш затребуваних засобів маневреної генерації завдяки їхній мобільності та здатності до швидкого пуску. Проте тривалий термін експлуатації більшості цих установок призвів до значного фізичного та морального зношення їхніх штатних систем керування [5]. Особливо гостро це стосується оригінальних електромашинних систем збудження, елементна база та алгоритми роботи яких не відповідають сучасним вимогам до стабільності напруги, перевантажувальної здатності та точності

регулювання в динамічних режимах [6]. Подальша надійна експлуатація генераторів типу СГС-14-100-6У2 (які входять до складу ЕГ2500) неможлива без повної заміни застарілої системи збудження на сучасну вентильну (статичну) систему [7]. Використання електромеханічних рішень минулих поколінь створює ризики аварійних зупинок, збільшує витрати на технічне обслуговування через відсутність запчастин та не дозволяє повноцінно інтегрувати станції в автоматизовані системи диспетчерського управління.

Впровадження сучасної цифрової системи вентильного збудження (СВГ) виробництва ТОВ «Плутон ІС» (м. Львів) є технологічно обґрунтованим рішенням для реновації ЕГ2500, а також при випуску нових установок.

Метою роботи є презентація рішень побудови вентильної системи збудження СВГ для електростанції ЕГ2500 та експериментальне налагодження параметрів її регулятора в умовах невизначеного навантаження.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Пересувна автоматизована газотурбінна електростанція ПАЕС-2500 (та її модифікація ЕГ2500) – це автономне джерело електричної енергії змінного трифазного струму, розроблене для оперативного забезпечення енергопотреб промислових та цивільних об'єктів (рис. 1). Основними перевагами установки є її мобільність, висока швидкість розгортання та здатність до швидкого пуску (вихід на номінальну потужність за 5–10 хвилин), що робить її незамінною як для пікового покриття навантажень, так і для роботи в якості основного джерела живлення в ізольованих енерговузлах.



Рис. 1. Електростанція ЕГ2500 під час випробувань

До складу силового блоку ЕГ2500 входять:

1. Приводний двигун: авіаційний турбореактивний двигун типу АІ-20, конвертований для роботи в наземних умовах. Він вирізняється високою надійністю та можливістю роботи на різних видах палива (природний газ, дизельне паливо).

2. Генератор: синхронний турбогенератор серії СГС-14-100-6У2.

3. Допоміжні системи: системи паливopодачі, мастильна система, блоки підготовки повітря та система автоматичного керування (САК).

Установка спроектована для роботи у трьох основних режимах:

1. Автономний режим: живлення локальних споживачів без зв'язку з енергосистемою.

2. Паралельний режим: робота в єдиній енергосистемі з видачею потужності в загальну мережу.

3. Режим синхронного компенсатора: використання генератора для регулювання реактивної потужності та підтримки рівнів напруги в мережі (за наявності відповідної муфти розчеплення з турбіною).

Попри високу надійність механічної частини, слабкою ланкою ЕГ2500 залишається застаріла система автоматизації та збудження. Штатні електромеханічні системи збудження мають низку критичних недоліків, серед яких: низька точність підтримки напруги при різких змінах навантаження, відсутність сучасних протоколів передачі даних для дистанційного моніторингу, складність налаштування та обмежені можливості діагностики несправностей.

Перехід на сучасну вентильну систему збудження СВГ дозволяє трансформувати ЕГ2500 у високотехнологічну одиницю розподіленої генерації. Використання мікропроцесорної системи забезпечує інтелектуальне керування струмом ротора, швидке гасіння поля та стабільну роботу генератора в складних перехідних режимах, що є вирішальним фактором для енергобезпеки в умовах дефіциту потужності. Конструктивно система збудження виконана у вигляді двох шаф, з одностороннім обслуговуванням: шафи тиристорного випрямляча ШТВ (рис. 2) та шафи комутації та захисту ШКЗ (рис. 3), розмірами 800х600х1600,0 мм кожна. ШТВ містить безпосередньо тиристорний випрямляч та мікропроцесорну систему керування, виготовлену ТОВ «НВП «Преобразователь-комплекс» [8]. ШКЗ має у своєму складі захисні автоматичні вимикачі, тиристорний розрядник, який використовується при виникненні перенапруг у роторі генератора, блок розрядних резисторів.

Система збудження генератора забезпечує [9]:

- пуск та зупинку генератора при розвороті та гальмуванні від турбіни;

- початкове збудження та включення в мережу методом точної ручної синхронізації в нормальних режимах роботи;

- роботу в енергосистемі з навантаженнями від холостого ходу до номінальної і з перевантаженнями, що допускаються для генератора;

- обмеження навантаження по струму статора за час-залежною характеристикою;

- обмеження перевантаження по струму ротора за час-залежною характеристикою;

- форсування збудження із заданою кратністю по струму ротора при просіданні напруги генератора з обмеженням тривалості форсування за перевантажувальною характеристикою;



Рис. 2. Зовнішній вигляд шафи тиристорного випрямляча у складі СВГ



Рис. 3. Зовнішній вигляд шафи комутації та захисту

- розбудження генератора у разі підвищення напруги на висновках статора генератора;
- гасіння поля генератора при нормальній зупинці генератора переведенням випрямляча в

інверторний режим, а при аварійних режимах і вимикачем гасіння поля;

- незалежне обмеження максимального та мінімального струму збудження з поділом режимів холостий хід/мережа;
- автоматичний та ручний режими регулювання збудження;
- регулювання напруги, реактивної потужності в автоматичному режимі;
- регулювання струму збудження в ручному режимі;
- пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання;
- підтримка головного регульованого параметра (напруги, реактивної потужності тощо) з точністю 0,5% від заданої статичної характеристики;
- дистанційне перемикання режимів регулювання;
- відсутність перехідного процесу в струмі збудження при перемиканні режимів регулювання;
- дистанційна зміна уставки збудження в автоматичному та ручному режимах;
- автоматичний перехід на ручний режим при порушеннях ланцюгів 100В генератора;
- автоматичне, пропорційне зниження напруги генератора при зниженні частоти;
- статизм з реактивного струму в регулюванні напруги для забезпечення паралельної роботи генераторів;
- обмеження напруги генератора в автоматичному режимі при раптовому відключенні від системи на виділене навантаження;
- можливість зняття при налагодженні статичних характеристик автоматичного регулятора збудження, а також характеристик холостого ходу та короткого замикання генератора;
- у всіх автоматичних режимах регулювання контроль та обмеження реактивної потужності генератора в залежності від активної в межах діаграми потужностей, що задається заводом-виробником генератора;
- постійний контроль опору ізоляції обмотки збудження та ланцюгів, пов'язаних з нею, від замикання на землю;
- можливість інтеграції в вже наявну систему автоматичного керування станції.

Система збудження синхронного генератора має в своєму складі силовий випрямляч, систему управління і регулювання, а також апаратні захисні засоби (рис. 4) [10]. Апаратні захисні засоби складаються з блоку захисту БЗ, який є граничним елементом, який спрацьовує при виникненні перенапруг на роторі генератора і вмикає тиристорний розрядник ТР, який скидає надлишкову енергію на резистор R2. У разі аварійної ситуації поле генератора гаситься автоматом гасіння поля АГП, у якості якого використано спеціалізований контактор КТ 6052/3, на резистор R1 з одночасним розривом ланцюга ротора.

(максимально швидкого, з мінімальним перерегулюванням і без автоколивань) в наступному порядку. Поступово, зменшуючи значення постійної часу РСЗБ, Ті спостерігати струм за осцилографом. Необхідно домогтися ступінчастої прямокутної форми струму. Зменшення коефіцієнта буде призводити до підвищення крутизни фронтів ступенів, а потім і до появи перерегулювання. При досягненні (5...10)% перерегулювання слід припинити зменшення коефіцієнта (подальше зменшення призведе до появи низькочастотних автоколивань). Поступово збільшуючи значення пропорційного коефіцієнта РСЗБ Кп спостерігати струм за осцилографом. Властивість пропорційного коефіцієнта полягає в здатності, одночасно з підвищенням крутизни фронтів ступенів, зменшувати перерегулювання і автоколивання,

викликані інтегральним коефіцієнтом. Тому, збільшуючи пропорційний коефіцієнт, необхідно домогтися зникнення перерегулювання в ступінчастій прямокутній формі струму. При зникненні перерегулювання слід припинити збільшення коефіцієнта (подальше значне збільшення Кп призведе до появи високочастотного биття в струмі. Практична настройка регулятора напруги аналогічна представленій вище для регулятора струму.

З використанням цієї методики на об'єкті було налаштовано регулятори СВГ та перевірено при різкому накиданні (рис. 5) та скиданні (рис. 6) навантаження 1 МВт. На осцилограмах червоним позначено струм збудження If, а синім – напругу статора Us.

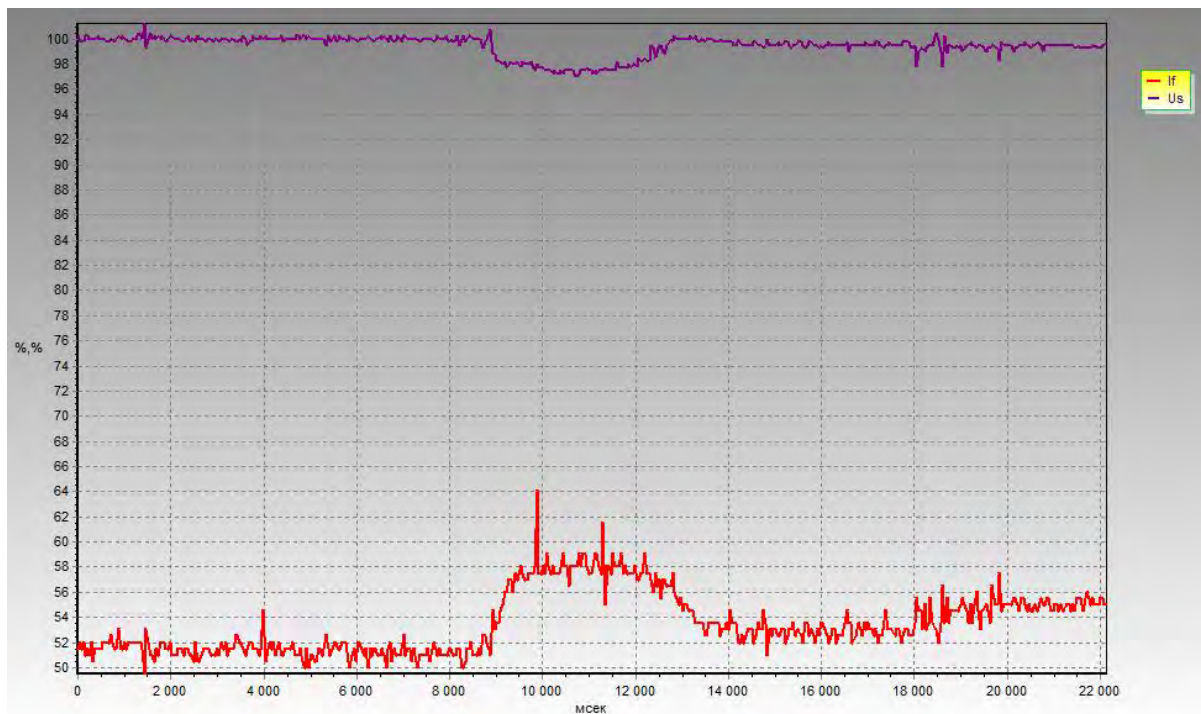


Рис. 5. Осцилограма напруги та струму збудження при накиданні навантаження 1МВт

При накиданні навантаження перерегулювання напруги становить близько 4% (при застосуванні електромеханічної системи збудження цей показник склав не менше 10%) [4], а час усталення визначається системою керування активною потужністю (подача пального турбіни) і становить 4 секунди (при 5с зі старою системою збудження). Можна бачити процес форсування струму збудження під час перехідного процесу в турбіні з подальшим усталенням його значення на новому рівні.

При скиданні навантаження 1МВт перехідний процес, в цілому, проходить легше: перерегулювання складає 2%, а час усталення – 2,5с.

Експлуатація ЕГ2500 з новою системою збудження показала покращення пускових характеристик генератору з урахуванням зміни характеру комутації у випрямлячі при зниженій частоті [15] та зменшення випадків застосування АГП при штатних відключеннях установки шляхом переведення випрямляча в інверторний режим, що підвищує ресурс цього комутаційного апарату, який має велику вартість.

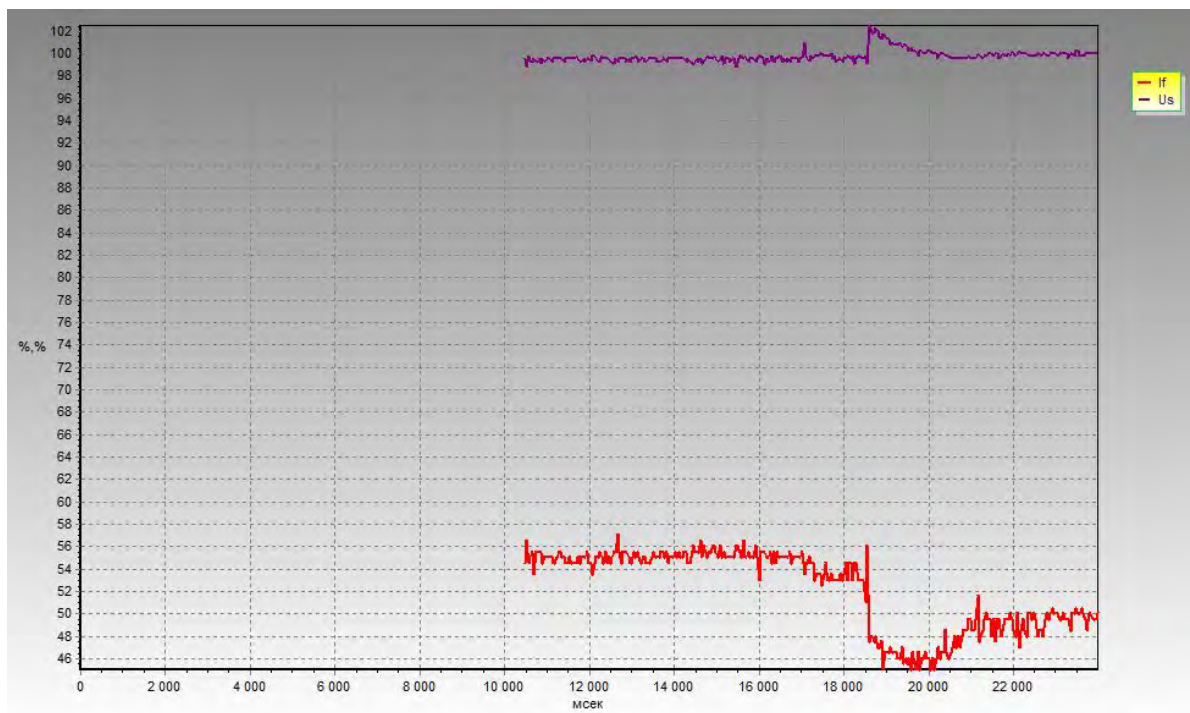


Рис. 6. Осцилограма напруги та струму збудження при скиданні навантаження 1МВт

Висновки. Застосування вентильної системи збудження синхронного генератора замість електромеханічної в електростанції ЕГ2500 дозволило покращити показники перехідного процесу при скиданні та накиданні навантаження з 10% до 4% для перерегулювання напруги статора та з 5с до 4с для часу усталення. Зменшення випадків застосування автомата гасіння поля при роботі з новою системою збудження підвищує його ресурс. Запропоновано та практично реалізовано в силовому перетворювачі ітераційний метод експериментального підбору параметрів мікропроцесорного регулятора в режимі "Пульси", який до того використовувався лише при налагодженні макрооб'єктів. Даний метод дозволяє в умовах апріорної невизначеності характеристик навантаження оптимізувати коефіцієнти K_p і K_i безпосередньо на промисловому об'єкті.

Література

1. Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#n16>. (дата звернення 13.04.2026).
2. Розподілена генерація в Україні: як децентралізовані рішення допомагають тримати тепло та водопостачання в умовах війни. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/rozpodilena-heneratsiia-v-ukraini-ia-k-detsentralizovani-rishennia-dopomahaiut-trymaty-teplo-ta-vodopostachannia-v-umovakh-viiny> (дата звернення 13.04.2026).
3. Газотурбінні електростанції та когенераційні установки виробництва ПрАТ «Південтрансенерго». URL: <http://yte.com.ua/ua/pdf/projects-e-c-c.pdf> (дата звернення 13.04.2026).
4. ПАЕС-2500. URL: <https://motorsich.com/ukr/products/land/seriynaya/eps/paes-2500/> (дата звернення 13.04.2026).
5. Энергетика: история, современность и будущее. Кн. 3: Развитие теплоэнергетики и гидроэнергетики / Базеев С.Т., Билека Б.Д., Васильев С.П. и др. К., Феникс, 2013: 400с.
6. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=109513 (дата звернення 13.04.2026).
7. Тиристорні системи збудження для пересувної газотурбінної електростанції. URL: <https://pluton.ua/projects/yuzhtransenergo>. (дата звернення 13.04.2026).
8. Науково-виробниче підприємство Преобразователь-комплекс. URL: <https://pcomplex.ua/>. (дата звернення 13.04.2026).
9. Система збудження генератора СВГ-88-310-2,0 УХЛЗ. Настанова з експлуатації. ЛЕКУ.651421.003. ТОВ «Плутон ІС». 62с.
10. Стрункін Г.М. Застосування пристроїв сигової електроніки. Дніпро: Середняк Т. К., 2024: 408с. ISBN 978-617-8139-59-9. DOI:<https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.
11. Глебов, И.А. Электромагнитные процессы систем возбуждения синхронных машин / И.А. Глебов, С.И. Логинов. М. Наука, 1987: 344с.
12. T.Ø. Gunne, J. Heggli, B. Lie, Models of synchronous generators with excitation system, for transient power system studies, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 2, 2018, Pp. 91-96, ISSN 2405-8963, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.016>.
13. Jerković, V., Miklošević, K., & Željko, Š. (2010). Excitation System Models of Synchronous Generator.

14. Ключев А.Ф. Автоматическое регулирование. М. Энергия, 1973: 280с.
15. Андриенко П.Д., Семенов В.В., Струнkin Г.Н., Немудрый И.Ю. Расчет характеристик выпрямителя при переменной частоте с учетом активного сопротивления контура коммутации. / Техническая электродинамика. Темат. вып. «Силовая электроника та енергоефективність» 2009. Ч.4. С.29-34. URL: https://www.researchgate.net/publication/394267484_2009_Rascet_harakteristik_vypramitela_pri_peremennoj_chastote_s_uchetom_aktivnogo_soprotivleniya_kontura_kommutacii. (дата звернення 13.04.2026).

References

1. Pro shvalennya Strategiyi rozvitku rozpodile-noyi generaciyi na period do 2035 roku i zatver-dzhennya operacijnogo planu zahodiv z yiyi reali-zaciyi u 2024 - 2026 rokah. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#n16>. (accessed 13.04.2026).
2. Rozpodilena generaciya v Ukraini: yak decentra-lizovani rishennya dopomagayut trimati teplo ta vodopostachannya v umovah vijni. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/rozpodilena-heneratsiia-v-ukraini-ia-k-detsentralizovani-rishennia-dopomahaiut-trymaty-teplo-ta-vodopostachannia-v-umovakh-viiny> (accessed 13.04.2026).
3. Gazoturbinni elektrostanciyi ta kogeneracijni ustanovki virobnictva PrAT «Pivdentranse-nergo». URL: <http://yte.com.ua/ua/pdf/projects-e-c-c.pdf> (accessed 13.04.2026).
4. PAES-2500. URL: <https://motorsich.com/ukr/products/land/seriynaya/eps/paes-2500/> (accessed 13.04.2026).
5. Energetika: istoriya, suchasnist i majbutnye. Kn. 3: Rozvitok teploenergetiki ta gidroenergetiki / Bazeyev Ye.T., Bileka B.D., Vasilyev Ye.P. ta in. K., Feniks, 2013: 400s.
6. DSTU EN 50160:2023 Harakteristiki naprugi elektropostachannya v elektrichnih mrezhah za-galnoyi priznachenosti. URL: https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=109513 (accessed 13.04.2026).
7. Tiristorni sistemi zbudzhennya dlya peresuvnoyi gazoturbinnoyi elektrostanciyi. URL: <https://pluton.ua/projects/yuzhtransenergo>. (accessed 13.04.2026).
8. Naukovo-virobniche pidpriyemstvo Preobrazo-vatel-kompleks. URL: <https://pcomplex.ua/>. (accessed 13.04.2026).
9. Sistema zbudzhennya generatora SVG-88-310-2,0 UHL3. Nastanova z ekspluataciyi. LEKU.651421.003. TOV «Pluton IC». 62s.
10. Strunkin G.M. Zastosuvannya pristroyiv silovoyi elektroniki. Dnipro: Serednyak T. K., 2024: 408s. ISBN 978-617-8139-59-9. DOI:<https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>.
11. Glebov, I.A. Elektromagnitnye processy si-stem vzbuzhdeniya sinhronnyh mashin / I.A. Glebov, S.I. Loginov. M. Nauka, 1987: 344s.
12. T.Ø. Gunne, J. Hegglid, B. Lie, Models of synchronous generators with excitation system, for transient power system studies, IFAC-PapersOnLine, Volume 51, Issue 2, 2018, Pp. 91-96, ISSN 2405-8963, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.03.016>.

13. Jerković, V., Miklošević, K., & Željko, Š. (2010). Excitation System Models of Synchronous Generator.
14. Klyuev A.F. Avtomaticheskoe regulirovanie. M. Energiya, 1973: 280s.
15. Andrienko P.D., Semenov V.V., Strunkin G.N., Nemudryj I.Yu. Raschet harakteristik vyprya-mitelya pri peremennoj chastote s uchetoм ak-tivnogo soprotivleniya kontura kommutacii. / Tehnicheskaya elektrodinamika. Temat. vyp. «Silova elektronika ta energoeftivnist» 2009. Ch.4. S. 29-34. URL: https://www.researchgate.net/publication/394267484_2009_Rascet_harakteristik_vypramitela_pri_peremennoj_chastote_s_uchetom_aktivnogo_soprotivleniya_kontura_kommutacii. (accessed 13.04.2026).

Strunkin H.M., Kryshthal S.V. Testing of the valve system of the generator excitation of the eg2500 unit

The article presents a comprehensive study and analysis of the implementation of a modern excitation system for gas turbine power plants of the EG2500 series. The relevance of the study is due to the current state of the energy sector of Ukraine, which is faced with a chronic deficit of electric power in the unified energy system. The article substantiates that under such conditions, the concept of decentralization and development of distributed generation facilities, capable of ensuring the autonomy of critical infrastructure and local power nodes, acquires strategic importance. The technical condition of the fleet of EG2500 mobile units, which are a key tool for maneuverable generation due to their mobility and ability to quickly start up, is considered in detail. A critical problem has been identified, according to which the long-term operation of these plants has led to deep moral and physical wear and tear of standard electromechanical excitation systems. Old electromechanical solutions do not provide the necessary accuracy of voltage regulation and speed in dynamic modes, which creates the risk of emergency stops and increases the cost of maintenance due to the shortage of spare parts. The central topic of the article is the implementation and testing of a new digital system for valve excitation of the SVG manufactured by Pluton IC LLC. The structural structure of the system, which consists of a thyristor rectifier cabinet and a switching and protection cabinet, is described. The functional capabilities of the microprocessor control system are analyzed in detail, including the implementation of the PID regulation law, automatic excitation forcing, overload limitation by time-dependent characteristics, and the possibility of integration into existing automatic control systems of stations. Special attention is paid to the method of experimental adjustment of the regulator parameters in the special "Pulse" mode. The proposed iterative method of experimental parameter selection is substantiated and applied, which allows achieving the optimal form of the transient process without self-oscillations. The practical part of the work presents the results of tests on a real object during a sharp start-up and load shedding of 1 MW. Comparative analysis showed a significant improvement in the indicators for stator voltage overregulation and mode establishment time. Additionally, the economic and operational effect of the introduction of the SVG is emphasized, in particular, an increase in the resource of the field extinguishing machine by switching the rectifier to inverter mode during regular stops.

Key words: distributed generation, gas turbine power plant, excitation system, synchronous generator, load shedding, overregulation.

Стрункін Гліб Миколайович – магістр, інженер відділу приводу та перетворювачів ТОВ «Плутон ІС». 79026, Україна, Львівська обл., місто Львів, вулиця Лукаша М., будинок 46 офіс 1,
<https://orcid.org/0009-0009-1719-4132>
e-mail: strunkingleb@gmail.com.

Кришталь Станіслав Володимирович – аспірант кафедри ЕПП НУ «Запорізька політехніка», головний конструктор ТОВ «НВП «Преобразователь-комплекс», 69076, Україна, м.Запоріжжя, вул. Новобудов, 5,
<https://orcid.org/0009-0001-2477-5658>
e-mail: krishtal_sv@ukr.net

Дата першого надходження статті 13.06.2026.

Дата прийняття статті до друку після рецензування 26.08.2026.

Дата публікації 30.09.2026.



Стаття з відкритим доступом,
відповідно до умов ліцензії
[Creative Commons \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)