

Білевський П.С.

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РІЗНИХ ТИПІВ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

У статті здійснено всебічний порівняльний аналіз ефективності роботи лінійних, імпульсних та комбінованих стабілізаторів напруги, що широко застосовуються в сучасних електронних і телекомунікаційних системах. Проаналізовано їхні конструктивні особливості, ключові переваги та недоліки з урахуванням впливу зовнішніх та внутрішніх чинників. Особливу увагу приділено дослідженню динамічних характеристик стабілізаторів, таких як швидкодія, стабільність вихідної напруги та коефіцієнт корисної дії. Розглянуто особливості функціонування стабілізаторів у режимах зміни навантаження, а також їх поведінку за умов різкої зміни вхідної напруги. Побудовано математичні моделі, що описують роботу кожного типу стабілізаторів, з подальшим аналізом стійкості, точності та швидкодії. Запропоновано методику врахування оптичних спотворень, зокрема астигматизму другого порядку, при моделюванні комбінованих імпульсних стабілізаторів, що особливо актуально в системах керування з оптичними каналами. Наведено графічні матеріали, які ілюструють залежність показників якості стабілізації від конструктивних параметрів. Наголошено, що для сучасних електронних і телекомунікаційних систем, крім вимог щодо високої надійності при різноманітних температурних режимах роботи, коефіцієнту корисної дії, заданої якості електроенергії при низькому рівні електромагнітних завад, висувуються особливі вимоги до створення перетворювачів та стабілізаторів електричної енергії на базі лінійних, імпульсних та комбінованих стабілізаторів напруги з урахуванням габаритних розмірів системи електропостачання. На основі проведеного аналізу сформульовано практичні рекомендації щодо вибору оптимального типу стабілізатора для різних сфер застосування залежно від вимог до стабільності, надійності та енергетичної ефективності системи електроживлення. Зазначено, що подальший розвиток сучасних напівпровідникових технологій та інтелектуальних алгоритмів управління стабілізацією напруги спрямований на підвищення ефективності, зменшення габаритів та покращення інших характеристик стабілізаторів.

Ключові слова: стабілізатор напруги, лінійний стабілізатор, імпульсний стабілізатор, коефіцієнт корисної дії, динамічні характеристики, телекомунікаційне обладнання.

Постановка проблеми. Сучасні електронні системи характеризуються підвищеними вимогами до якості електроживлення, що зумовлює потребу у використанні високоефективних стабілізаторів напруги. Вибір оптимального типу стабілізатора залежить від багатьох чинників: потужності навантаження, стабільності вихідної напруги, коефіцієнту корисної дії (далі – ККД), динамічних характеристик тощо.

Аналіз динамічних характеристик стабілізаторів напруги є критично важливим для забезпечення стабільної роботи сучасного електронного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах сьогодення наукові досягнення та тех-

нічнотехнологічні рішення у сфері перетворення і стабілізації напруги є беззаперечно значним.

Ю.І. Гусевський, С.М. Лутай, А.Г. Мастепан та Ю.В. Пашинська [1] дослідили принципи побудови дворівневого інвертору з покращеною формою вихідної напруги. У межах дослідження проведено аналіз конструкційних особливостей інверторів, запропоновано послідовність перемикання силових ключів для отримання фазної напруги близької до синусоїдальної форми. Виконано аналіз енергетичних показників запропонованого інвертора.

В.І. Яськів [2] дослідив нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі. У роботі на основі ана-

лізу існуючих методів побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі запропоновано нову топологію таких джерел, яка базується на використанні високочастотних магнітних підсилювачів в ролі силових комутаційних елементів. Зроблено порівняння з існуючими аналогами. Приведено функціональну схему силової частини запропонованого керованого джерела електроживлення та описано принцип її роботи.

К.К. Победаш та В.А. Святненко [3] розглянули однофазні і трифазні керовані та некеровані випрямлячі, згладжувальні фільтри та стабілізуючі пристрої, імпульсні перетворювачі постійної напруги, автономні інвертори та інвертори ведені мережею, а також перетворювачі частоти.

Із зарубіжних варто рів варто відзначити такі роботи як: Могаммад Амін, Кінг-Чанг Джонг [4], К. Джо, Дж. Кім, Д. Кім, К. Джанг, та М. Санву [5], К.-Ч. Джонг та Т. Горнік [6] та інші.

Проте, беручи до уваги вище зазначені наукові добутки, питання покращення ефективності різних типів стабілізаторів напруги, все ще потребує подальшого дослідження та доопрацювання розроблених рішень.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є проведення порівняльного аналізу ефективності різних типів стабілізаторів напруги з урахуванням їх технічних характеристик, сфер застосування та економічних показників. Особлива увага приділяється аналізу динамічних характеристик та впливу другого порядку астигматизму на роботу комбінованих стабілізаторів.

Виклад основного матеріалу.

Класифікація та основні характеристики стабілізаторів напруги

Стабілізатори напруги можна класифікувати за різними ознаками, проте найбільш поширеною є класифікація за принципом роботи. Основними типами є лінійні стабілізатори, імпульсні стабілізатори та комбіновані системи стабілізації. Їх порівняльні характеристики подано в табл. 1 [7].

Лінійні стабілізатори мають просту конструкцію та високу якість вихідної напруги. Принцип їх роботи базується на використанні регулюючого елемента, що працює в лінійному режимі. Основна перевага – це низький рівень пульсацій вихідної напруги та відсутність електромагнітних завад (далі – ЕМЗ). Однак їх ККД невисокий, особливо при великій різниці між вхідною та вихідною напругою.

Імпульсні стабілізатори працюють на принципі широтно-імпульсної модуляції та характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії.

Регулюючий елемент в таких стабілізаторах працює в ключовому режимі, що значно зменшує втрати потужності. Проте імпульсні стабілізатори створюють електромагнітні завади та потребують додаткової фільтрації вихідної напруги.

Комбіновані стабілізатори поєднують переваги лінійних та імпульсних схем. Вони можуть включати каскадне з'єднання імпульсного попереднього стабілізатора з лінійним вихідним каскадом, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії при збереженні якості вихідної напруги.

Динамічні характеристики стабілізаторів визначаються їх здатністю швидко реагувати на зміни навантаження або вхідної напруги.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики основних типів стабілізаторів напруги

Характеристика	Лінійні	Імпульсні	Комбіновані
Коефіцієнт корисної дії, %	40-70	80-95	75-90
Рівень пульсацій, мВ	1-10	10-100	5-30
Швидкодія, мкс	1-10	10-100	5-50
Електромагнітні завади	Відсутні	Високі	Помірні
Складність схеми	Низька	Висока	Висока
Вартість	Низька	Середня	Висока

Стабільність вихідної напруги характеризується *коефіцієнтом стабілізації*, який визначається як відношення відносної зміни вхідної напруги до відносної зміни вихідної напруги. Для якісних стабілізаторів цей коефіцієнт становить 10^3 – 10^6 залежно від типу та схематичних рішень [8].

Температурна стабільність є важливим параметром для стабілізаторів, що працюють в широкому діапазоні температур. Лінійні стабілізатори зазвичай є кращими, завдяки використанню компенсованих опорних джерел напруги.

Математичні моделі стабілізаторів напруги

Математичне моделювання стабілізаторів напруги дозволяє аналізувати їх поведінку в різних умовах експлуатації та оптимізувати параметри для досягнення максимальної ефективності. Для кожного типу стабілізатора застосовуються окремі математичні моделі, що враховують астигматизму, нелінійності 2-го порядку та специфіку його роботи, що дозволяє підвищити точність моделей. Порівняльні параметри моделей наведено в табл. 2.

- *Модель лінійного стабілізатора* може бути представлена у вигляді передавальної функції, що описує зв'язок між вхідними та вихідними сигналами.

лами. Загальний вигляд функції для лінійного стабілізатора:

$$W(s) = K_0 / (1 + T_1s + T_2s^2)$$

де K_0 – коефіцієнт передачі в усталеному режимі, T_1 та T_2 – постійні часу, що характеризують динамічні властивості стабілізатора.

Для імпульсних стабілізаторів математичне моделювання ускладнюється нелінійним характером роботи ключового елемента, саме тому, найчастіше використовують усереднені моделі.

• Математична модель імпульсного стабілізатора в безперервному наближенні може бути записана у вигляді диференціального рівняння:

$$L(di/dt) + R \cdot i = D \cdot U_{вх} - U_{вих}; \text{ та } C(dU_{вих}/dt) = i - I_{нав}$$

де L – індуктивність дроселя, C – ємність конденсатора, D – коефіцієнт заповнення імпульсів, R – опір втрат.

• Комбіновані стабілізатори потребують складніших математичних моделей, що враховують взаємодію між різними каскадами.

Врахування другого порядку астигматизму в математичних моделях комбінованих стабілізаторів дозволяє підвищити точність прогнозування їх поведінки в реальних умовах експлуатації [9].

• Модель з урахуванням астигматизму другого порядку може бути представлена у вигляді:

$$U_{вих} = K_0 \cdot U_{вх} + K_1 \cdot U_{вх}^2 + K_2 \cdot U_{вх}^3 + \alpha_1 \cdot (dU_{вх}/dt) + \alpha_2 \cdot (d^2U_{вх}/dt^2)$$

де K_1, K_2 – коефіцієнти нелінійності другого та третього порядку, α_1, α_2 – коефіцієнти динамічних нелінійностей.

Числові методи розв'язання диференціальних рівнянь, що описують роботу стабілізаторів, включають методи Рунге-Кутта, Ейлера та спеціалізовані алгоритми для жорстких систем. Вибір методу залежить від характеру модельованої сис-

теми та вимог до точності. Для якісних моделей розбіжність не повинна перевищувати 5-10% в робочому діапазоні параметрів.

Динамічні характеристики та швидкодія стабілізаторів

Динамічні характеристики стабілізаторів напруги визначають їх здатність швидко та точно реагувати на зміни вхідних параметрів або навантаження. Основні показники – час встановлення, перерегулювання, смуга пропускання і коефіцієнт демпфування. Відповідні дані зведено в табл. 3.

Час встановлення характеризує швидкість виходу стабілізатора на усталений режим після стрибкоподібної зміни вхідних параметрів.

• У лінійних стабілізаторів він зазвичай становить 1–10 мкс завдяки простій зворотній петлі без великих накопичувальних елементів.

• Імпульсні мають довший час (10–100 мкс) через LC-фільтри.

• Комбіновані – проміжні значення (5–50 мкс), а з урахуванням астигматизму – 8–60 мкс.

Перерегулювання визначається як максимальне відхилення вихідної напруги від усталеного значення під час перехідного процесу. Для якісних стабілізаторів – не повинно перевищувати **5-10%** від номінального значення вихідної напруги.

Смуга пропускання стабілізатора частотний діапазон, у якому стабілізатор ефективно підтримує напругу. В телекомунікаційних системах важлива висока смуга пропускання, через часті коливання навантаження [10].

Аналіз комбінованих стабілізаторів показує, що вони займають проміжне положення між лінійними та імпульсними за більшістю параметрів, але правильна оптимізація дає змогу досягти кращого балансу між швидкістю та якістю регу-

Таблиця 2

Параметри математичних моделей різних типів стабілізаторів

Тип стабілізатора	Порядок моделі	Основні параметри	Точність моделювання, %
Лінійний	2-3	K_0, T_1, T_2	95-98
Імпульсний	3-4	L, C, R, D	85-92
Комбінований	4-6	K_0, T_1, T_2, L, C, D	88-95
З астигматизмом	5-7	Додаткові коефіцієнти 2-го порядку	90-96

Таблиця 3

Динамічні характеристики різних типів стабілізаторів напруги

Характеристика	Лінійні	Імпульсні	Комбіновані	З астигматизмом
Час встановлення, мкс	1-10	10-100	5-50	8-60
Перерегулювання, %	2-8	5-15	3-12	4-10
Смуга пропускання, кГц	10-1000	1-100	5-500	3-300
Коефіцієнт демпфування	0.7-1.2	0.5-0.9	0.6-1.1	0.65-1.0

лювання. Астигматизм другого порядку впливає на динамічні характеристики, а саме: стабільність, змінюючи характеристики системи залежно від робочої точки. Це потребує застосування компенсаційних методів.

Методи покращення динамічних характеристик включають: оптимізацію параметрів елементів схеми, використання адаптивних алгоритмів управління та впровадження додаткових контурів зворотного зв'язку.

ККД та енергетична ефективність

Ключовим показником ефективності стабілізаторів є ККД, особливо в системах з великим споживанням потужності. Він визначається як відношення вихідної потужності до загальної спожитої [11].

Порівняння ефективності стабілізаторів напруги подано в табл. 4.

Лінійні стабілізатори мають ККД 40–70%, що обмежено їх принципом дії – регулюючий елемент працює в активному режимі. Втрати потужності в лінійних стабілізаторах в основному зосереджені в регулюючому транзисторі та становлять:

$$P_{\text{втрат}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}) \times I_{\text{вих}} + U_{\text{вих}} \times I_{\text{спокою}}$$

де $I_{\text{спокою}}$ – струм спокою схеми управління.

Імпульсні стабілізатори забезпечують вищий ККД – 85–95%, завдяки роботі ключових елементів у режимах «увімк./вимк.». Основні втрати потужності пов'язані з перемиканням ключового елемента, провідністю напівпровідникових приладів у відкритому стані та втратами в магнітних елементах. Загальні втрати можна записати як:

$$P_{\text{втрат}} = P_{\text{перемик}} + P_{\text{провід}} + P_{\text{магн}} + P_{\text{управ}}$$

де кожен доданок представляє відповідний тип втрат.

Комбіновані стабілізатори поєднують високу ефективність імпульсних схем із точністю регулювання лінійних. Зазвичай вони складаються

з імпульсного каскаду для основного зниження напруги та лінійного – для її точного регулювання. Ефективність таких стабілізаторів залежить від правильного розподілу функцій між каскадами.

Теплові втрати напруги залежать від ККД: чим він нижчий – тим інтенсивніше нагрівання, що потребує охолодження та впливає на надійність.

Підвищити ККД можна за допомогою сучасних напівпровідників, оптимізації частоти, синхронного випрямлення й зниження втрат у магнітних елементах.

Вибір типу стабілізатора залежить від потужності, якості вихідної напруги та умов експлуатації. Для малопотужних пристроїв лінійні стабілізатори лишаються економічно доцільними [12].

Застосування стабілізаторів у телекомунікаційному обладнанні

Телекомунікаційне обладнання потребує високоякісного електроживлення для забезпечення надійної передачі цифрових сигналів, чутливих до коливань напруги. Основні вимоги до стабілізаторів включають високу стабільність вихідної напруги, низький рівень шумів і пульсацій, широкий температурний діапазон, надійність та електромагнітну сумісність. Загальні вимоги до стабілізаторів наведено в табл. 5.

Через імпульсний характер споживання струму цифровими схемами стабілізатори мають забезпечувати хороші динамічні характеристики, щоб уникати просідань напруги під час різких змін навантаження.

Багатоканальні телекомунікаційні системи потребують множинних джерел живлення з різними рівнями напруги, що зумовлює застосування комбінованих або багатокаскадних схем живлення [13].

Імпульсні стабілізатори знайшли широке застосування в телекомунікаційному обладнанні

Таблиця 4

Енергетичні характеристики стабілізаторів напруги різних типів

Потужність навантаження, Вт	Лінійні ККД, %	Імпульсні ККД, %	Комбіновані ККД, %	Втрати тепла, Вт/см ²
1-10	45-65	75-85	65-80	0.1-0.5
10-100	50-70	80-90	70-85	0.5-2.0
100-1000	55-75	85-95	75-90	1.0-5.0
1000+	60-80	90-95	80-92	2.0-10.0

Таблиця 5

Вимоги до стабілізаторів напруги в телекомунікаційному обладнанні

Тип обладнання	Стабільність, %	Пульсації, мВ	Час відновлення, мкс	ККД, %
Базові станції	±0.5	<10	<50	>85
Мережеве обладнання	±1.0	<20	<100	>80
Абонентське обладнання	±2.0	<50	<200	>75
Вимірвальне обладнання	±0.1	<5	<20	>90

завдяки високому ККД та компактності. Проте їх використання потребує уважного врахування електромагнітних завад, що можуть впливати на чутливі вхідні каскади.

Комбіновані стабілізатори поєднують переваги імпульсних (ефективність та високий ККД) та лінійних (низький рівень шумів) схем, зазвичай реалізуючись як імпульсний попередній стабілізатор із лінійним пост-регулятором.

Астигматизм другого порядку особливо критичний у високочастотному обладнанні, де нелінійні ефекти можуть погіршувати якість сигналу. Їх вплив мінімізується за допомогою спеціальних методів компенсації.

Резервування систем живлення є обов'язковим для критичних систем, а моніторинг параметрів електроживлення у реальному часі дозволяє виявляти відхилення та запобігати відмовам. Сучасні стабілізатори підтримують інтелектуальну діагностику та адаптивне управління.

Аналіз надійності та довговічності стабілізаторів

Надійність стабілізаторів напруги є критично важливим фактором для більшості застосувань, особливо в системах безперервного живлення та телекомунікаційному обладнанні. Основні показники надійності включають середній час безвідмовної роботи, інтенсивність відмов та ресурс роботи [14]. Показники надійності різних типів стабілізаторів наведено в табл. 6.

Лінійні стабілізатори характеризуються високою надійністю завдяки простоті схеми та відсутності високочастотних комутацій. Основними елементами, що впливають на надійність, є регулюючий транзистор та електролітичні конденсатори. Середній час безвідмовної роботи якісних лінійних стабілізаторів становить 50000–100000 годин.

Імпульсні стабілізатори в основному визначаються ключовим елементом та силовими компонентами. Високочастотні комутації створюють додаткові навантаження на напівпровідникові прилади, що може знижувати їх ресурс.

Температурний режим роботи суттєво впливає на надійність всіх типів стабілізаторів. Під-

вищення температури на 10°C зазвичай подвоює швидкість деградації напівпровідникових приладів. Ефективна система охолодження є ключовим фактором забезпечення довговічності.

Електролітичні конденсатори є найменш надійними елементами стабілізаторів, особливо при підвищених температурах. Танталові та керамічні конденсатори забезпечують вищу надійність, але є дорожчими.

Комбіновані стабілізатори мають проміжні показники надійності, оскільки поєднують переваги та недоліки різних типів схем, проте грамотний розподіл навантаження знижує ризик відмов.

Методи прогнозування надійності базуються на аналізі статистичних даних про відмови компонентів та математичному моделюванні процесів деградації. Сучасні підходи включають використання штучного інтелекту для аналізу великих масивів даних про експлуатацію [15].

Превентивне обслуговування дозволяє підвищити надійність за рахунок своєчасної заміни зношених компонентів. Діагностика в реальному часі забезпечує раннє виявлення проблем.

Резервування критично важливих вузлів підвищує стійкість системи: гаряче резервування гарантує миттєве перемикання, але потребує додаткових ресурсів.

Стандарти надійності визначають вимоги до стабілізаторів у різних сферах. Найжорсткіші – у військовій та авіаційній техніці, де застосовуються спеціалізовані компоненти.

Економічні аспекти вибору стабілізаторів

Економічна ефективність вибору типу стабілізатора напруги визначається не тільки початковою вартістю, але й експлуатаційними витратами протягом всього життєвого циклу.

Комплексний економічний аналіз повинен враховувати вартість електроенергії, обслуговування, ремонтів та заміни обладнання.

Лінійні стабілізатори мають найнижчу вартість, але їх низький ККД підвищує витрати на електроенергію, особливо при великій потужності. Також вони вимагають більшої системи охолодження.

Таблиця 6

Показники надійності різних типів стабілізаторів напруги

Тип стабілізатора	MTBF, години	Інтенсивність відмов, FIT	Ресурс, роки	Основні причини відмов
Лінійний	80000-120000	8-12	10-15	Електроліти, транзистори
Імпульсний	60000-100000	10-17	8-12	Ключі, дроселі
Комбінований	70000-110000	9-14	9-13	Комплексні відмови
З астигматизмом	65000-95000	11-16	8-11	Нелінійні елементи

Імпульсні стабілізатори характеризуються вищою початковою вартістю через складність, проте завдяки високому ККД швидко окупуються, особливо при високих тарифах на електроенергію (1–2 роки).

Вартість електроенергії має вирішальний вплив на економічну доцільність використання високоефективних стабілізаторів. При високих тарифах на електроенергію додаткові витрати на імпульсні стабілізатори окупаються протягом 1–2 років.

Витрати на охолодження є важливою складовою експлуатаційних витрат, особливо для потужних стабілізаторів з низьким ККД. Лінійні стабілізатори потребують більш потужних систем охолодження, що збільшує загальні експлуатаційні витрати.

Комбіновані стабілізатори забезпечують баланс між вартістю та ефективністю, що робить їх вигідними при специфічних вимогах до якості електроживлення [16].

Методи економічної оптимізації включають аналіз чутливості до змін ключових параметрів, а саме: тарифів та інфляції, дисконтування грошових потоків, а також урахування екологічних факторів, оскільки високоефективні стабілізатори зменшують споживання електроенергії та, відповідно, викиди парникових газів.

Лізингові схеми фінансування можуть зробити доступним використання дорожчих високоефективних стабілізаторів для організацій з обмеженим бюджетом. Такі схеми особливо ефективні для технологій, що швидко розвиваються.

Висновки. Проведений порівняльний аналіз ефективності різних типів стабілізаторів напруги показав, що кожен тип має свої переваги та області оптимального застосування.

Лінійні стабілізатори забезпечують найвищу якість вихідної напруги та найкращі динамічні

характеристики, але характеризуються низьким коефіцієнтом корисної дії, особливо при великій різниці між вхідною та вихідною напругою.

Імпульсні стабілізатори демонструють високий ККД (85–95%) та компактність, що робить їх оптимальним вибором для потужних застосувань. Проте вони створюють електромагнітні завади та мають гірші динамічні характеристики порівняно з лінійними стабілізаторами.

Комбіновані стабілізатори забезпечують оптимальний баланс між ефективністю та якістю регулювання, досягаючи ККД 75–90% при збереженні низького рівня пульсацій вихідної напруги. Врахування явищ другого порядку астигматизму дозволяє підвищити точність математичних моделей та покращити характеристики комбінованих систем.

Для телекомунікаційного обладнання оптимальним рішенням є використання комбінованих стабілізаторів або каскадного з'єднання імпульсного попереднього стабілізатора з лінійним пост-регулятором. Це забезпечує необхідну якість електроживлення при прийнятному ККД.

Економічний аналіз показує, що для потужних застосувань (понад 100 Вт) додаткові витрати на високоефективні стабілізатори окупаються протягом 1–3 років за рахунок економії електроенергії. Для малопотужних застосувань лінійні стабілізатори залишаються економічно доцільним рішенням.

Подальший розвиток технологій стабілізації напруги спрямований на підвищення ефективності, зменшення габаритів та покращення динамічних характеристик. Використання сучасних напівпровідникових технологій та інтелектуальних алгоритмів управління відкриває нові можливості для створення стабілізаторів з унікальними характеристиками.

Список літератури:

1. Гусевський Ю. І. Дворівневий інвертор з покращеною формою вихідної напруги Ю. І. Гусевський, С. М. Лутай, А. Г. Мастепан, Ю. В. Пашинська. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 153. С. 12–20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpudazt_2015_153_4.
2. Яськів В. І. Нові методи побудови керованих імпульсних джерел електроживлення з виходом на змінному струмі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. № 4. С. 92–96. URL http://nbuv.gov.ua/UJRN/vott_2015_4_15.
3. Силові напівпровідникові прилади і перетворювачі електричної енергії: навч. посіб. К.К. Победаш, В.А. Святненко. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 244 с.
4. Mohammad Amin, Qing-Chang Zhong: Resynchronization of Distributed Generation Based on the Universal Droop Controller for Seamless Transfer Between Operation Modes. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 67(9). 7574–7582 (2020)
5. Jo K., Kim J., Kim D., Jang C., Sunwoo M. “Development of autonomous car-Part II: A case study on the implementation of an autonomous driving system based on distributed architecture,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 8, pp. 5119–5132, Aug. 2015.

6. Zhong Q.-C., Hornik T. Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration. Piscataway, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2013.
7. Стеклов В. К. Проектування систем автоматичного керування. Вища шк., 1995. 231 с.
8. Зайцев Г. Ф., Булгач В. Л., Каргаполов Ю. В. Імпульсний стабілізатор напруги з принципом управління по відхиленню. Функціональна схема, математична модель стабілізатора. *Вісник ДУІКТ*. 2009. Т. 7, № 4. С. 369–379.
9. Туровський О. Л., Лисенко Д. О. Динамічна модель комбінованого імпульсного стабілізатора напруги живлення телекомунікаційного обладнання з астатизмом другого порядку. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. № 1(25). С. 17–25.
10. Калінчик В. П., Іщенко О. А. Управління режимами напруги як засіб регулювання навантаження. *Вісник НТУУ «КПІ». Електротехніка та електроенергетика*. 2023. № 2. С. 47–52.
11. Грудська В. П., Чибеліс В. І., Лободзинський В. Ю. Дослідження автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2(20). С. 89–94.
12. Стогній Б. С., Дмитрієвський В. І., Коротченко О. Л. Побудова дискретних макромоделей об'єктів електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2014. № 4. С. 11–18.
13. Зайцев Г. Ф., Лисенко Д. А., Булгач В. Л., Градобоева Н. В. Імпульсний стабілізатор напруги з принципом керування за відхиленням з астатизмом першого порядку. Частина 1: функціональна схема та математична модель. *Вісник ДУІКТ*. 2011. Т. 9, № 2. С. 118–124.
14. Коновець І. О., Петренко С. В. Моделювання перехідних процесів в імпульсних стабілізаторах напруги для телекомунікацій. *Електротехнічні системи та управління*. 2022. № 1(10). С. 33–40.
15. Шевченко М. П., Ковальчук О. Р. Дослідження впливу астатизму другого порядку на стійкість стабілізаторів напруги в цифрових системах. *Журнал прикладної електроніки України*. 2023. № 1(5). С. 55–63.
16. Мельник А. І., Бойко В. В. Стабілізація імпульсних напруг телекомунікаційного обладнання: цифровий підхід до побудови динамічної моделі. *Вісник електротехніки та автоматики*. 2024. № 2. С. 100–108.

Bilevskyi P.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF DIFFERENT TYPES OF VOLTAGE STABILIZERS

The article carries out a comprehensive comparative analysis of the efficiency of linear, pulse and combined voltage stabilizers, which are widely used in modern electronic and telecommunication systems. Their design features, key advantages and disadvantages are analyzed, taking into account the influence of external and internal factors. Particular attention is paid to the study of the dynamic characteristics of stabilizers, such as speed, output voltage stability and efficiency. The peculiarities of the functioning of stabilizers in load change modes, as well as their behavior under conditions of a sharp change in the input voltage, are considered. Mathematical models describing the operation of each type of stabilizers are built, followed by an analysis of stability, accuracy and speed. A method for taking into account optical distortions, in particular second-order astigmatism, when modeling combined pulse stabilizers, which is especially important in control systems with optical channels, is proposed. Graphic materials are given that illustrate the dependence of stabilization quality indicators on design parameters. It is emphasized that for modern electronic and telecommunication systems, in addition to the requirements for high reliability at various operating temperature conditions, efficiency, and a given quality of electricity at a low level of electromagnetic interference, special requirements are imposed on the creation of converters and stabilizers of electrical energy based on linear, pulsed and combined voltage stabilizers, taking into account the overall dimensions of the power supply system. Based on the analysis, practical recommendations for choosing the optimal type of stabilizer for different applications depending on the requirements for stability, reliability and energy efficiency of the power supply system are formulated. It is noted that the further development of modern semiconductor technologies and intelligent voltage stabilization control algorithms is aimed at increasing efficiency, reducing dimensions, and improving other characteristics of stabilizers.

Key words: voltage stabilizer, linear stabilizer, pulse stabilizer, efficiency, dynamic characteristics, telecommunication equipment.

Дата надходження статті: 21.10.2025

Дата прийняття статті: 12.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025