

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTICS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

---

УДК 621.3.015.2

В.П. Грудська, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-7775-6397  
В.І. Чибеліс, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2235-9826  
В.Ю. Лободзинський, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-1167-824X  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЯТОРА- СТАБІЛІЗАТОРА ВИХІДНОЇ НАПРУГИ АВТОНОМНОГО ІНВЕРТОРА

*В роботі представлені результати дослідження автоматичного регулятора стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора. Удосконалення системи управління автономного інвертора дозволило підвищити точність стабілізації вихідної напруги інвертора, що дало можливість спростити налаштування системи управління для легкого узгодження з іншими програмними елементами. Шляхом введення цифрової форми задання уставки стабілізованої напруги і цифрової форми порівняння з опорною напругою досягнуто високу точність стабілізації напруги, яка за відсутністю аналогової ланки не залежить від вибору і ретельного налаштування елементів, що визначається стабільністю генератора напруги і шириною зони чутливості. Дослідження показали, що регулювання напруги перетворювача здійснюється зміною установки рівня, пов'язаною зі зсувом зони нечутливості. Швидкість відпрацювання заданого кута регулювання залежить від частоти слідування імпульсів генератора, яка обмежується тільки частотними властивостями інтегральних мікросхем. А при рівності частот генераторів імпульсів, мінімальній ширині зони нечутливості і зміні навантаження від номінального до неробочого ходу точність стабілізації вихідної напруги інвертора склала 0,5 %.*

**Ключові слова:** автономний інвертор, стабілізація, вихідна напруга, автоматичне регулювання, фазо-імпульсне управління.

**Вступ.** Ефективність споживання електроенергії в значній мірі залежить від функціонування перетворювачів змінної і постійної напруги, які розповсюджені практично в усіх електротехнічних галузях. Використання електричної енергії в різних областях техніки пов'язано з оптимальними умовами її генерації, передачі та розподілу. Для найбільш ефективного використання електричної енергії різні споживачі вимагають споживання її з нестандартними параметрами. Тому між джерелом енергії та споживачем необхідні перетворювачі електроенергії. Найбільш поширеною областю споживання електроенергії є електропривод. Імпульсна модуляція і цифрові засоби керування дозволяють перевести керування асинхронним двигуном на принципово новий рівень, при якому можливо керування як швидкості, так і моменту асинхронного двигуна, наближаючи його за властивостями керованості до двигуна постійного струму. Ефективне керування асинхронним двигуном дозволяє отримати великий економічний ефект від енергозбереження за рахунок оптимального керування. Створення напівпровідникових приладів великої потужності, які працюють в ключових режимах, мають повну керованість і високу швидкодію, дозволило дискретно керувати потоками електричної енергії великої потужності на підвищених частотах за потрібними законами. Пристрої, побудовані на цих приладах, застосовуються в різних областях техніки і мають при передачі та споживанні електроенергії нові функціо-

нальні можливості, менші втрати електроенергії, дозволяють підвищити її якість, а також успішно вирішувати екологічні питання [1].

У наш час силові перетворювальні пристрої широко використовують у кольоровій металургії та хімічній промисловості, на залізничному та міському транспорті, для живлення контактних мереж гірничорудного та інших видів промислового транспорту, у різних галузях промисловості: для регульованих електроприводів, збудження електричних машин, для зарядження акумуляторів, електросварювання, гальванотехніки, електроерозійної обмотки металів, для високовольтних ліній електропередач постійного струму, у джерелах вторинного електроживлення електронної апаратури та ін.

Основними областями застосування пристроїв сигової електроніки, в яких вони дають найбільший економічний ефект, зараз є: засоби регулювання виробності технологічних кіл ТЕС і ГЕС (скорочення енерго споживання на власні потреби, що призводить до зниження собівартості 1 кВт·год); промисловий електропривод, який керується за допомогою напівпровідникового перетворювача електроенергії; комунальне господарство, вуличне освітлення натрієвими лампами високого тиску з електронною пускорегульовальною апаратурою, освітлення громадських приміщень компактними люмінісцентними лампами щ електронним баластом; підвищення ефективності джерел вторинного електроживлення за рахунок використання імпульсних способів перетворення електроенергії; автомобільна електроніка; побутова техніка [2].

Якість і точність підтримання рівня і форми вихідного параметру напруги і струму таких перетворювачі визначається не тільки функціональними можливостями сигової частини, але й оптимальним алгоритмом і швидкістю системи управління (СУ). Сучасні цифрові СУ реалізують будь-який алгоритм керування ключами (тиристорами, транзисторами) і забезпечують їхню надійну роботу в усіх режимах. Більшість відомих цифрових СУ містить аналогову ланку, в якій виконується порівняння вихідної напруги з опорною і інформація про результат порівняння видається в аналоговій формі, що ускладнює її спряження з сучасними цифровими пристроями програмованого управління [3].

**Мета та завдання.** Удосконалення системи управління автономного інвертора шляхом введення цифрової форми завдання уставки стабілізованої напруги і цифрової форми порівняння з опорною напругою, що підвищує точність стабілізації вихідної напруги інвертора, суттєво спрощує налаштування системи управління і дозволяє легко узгоджувати її з іншими програмними елементами.

**Матеріали і результати досліджень.** Автоматичний регулятор-стабілізатор входить у систему управління автономного інвертора (Рис. 1), вихідна напруга якого регулюється шляхом фазового зсуву між моментами вступу у роботу окремих груп вентилів (регулювання кута управління  $\alpha$ ).

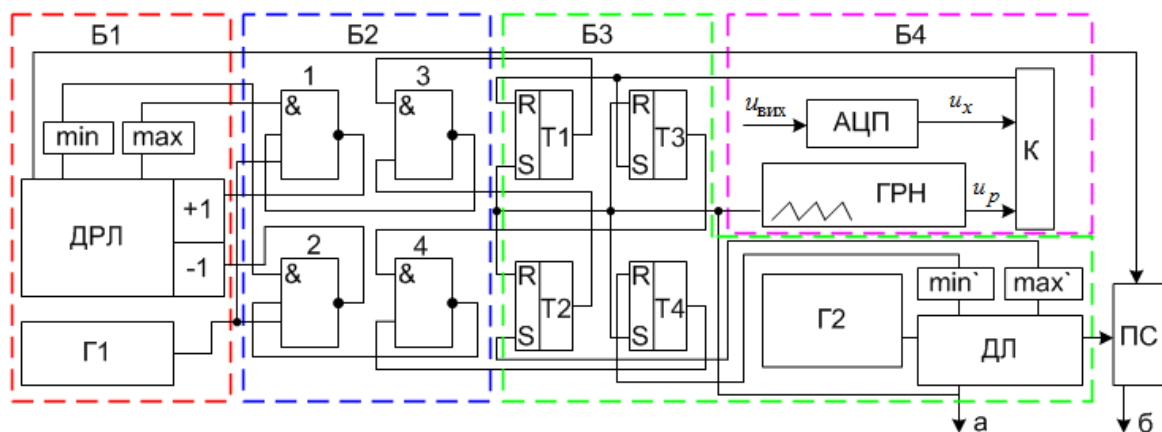


Рисунок 1 – Блок схема автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора

За фазо-імпульсного способу управління найбільш доцільною є побудова регулятора за принципом три зонності, сутність якого полягає в наступному: значення вхідної напруги інвертора задається двійковим кодом у двійковий реверсивний лічильник (ДРЛ) фазо зсувного пристрою СУ. У регуляторі періодично формується зона нечутливості з чітко визначеними границями «менше» і «більше» (періодичність формування такої зони визначається дискретним характером роботи вентилів). Компаратор порівнює вихідну напругу інвертора з пілкоподібною опорною напругою і видає відповідний сигнал. Якщо цей сигнал попадає у зону нечутливості, то вихідна напруга приймає значення «норма» і регулювання не потрібне, якщо сигнал компаратора з'являється за межами зони чутливості, то значення вихідної напруги «менше» або «більше» допустимого і регулятор видає команду на корегування кута керування  $\alpha$ .

Зміна кута  $\alpha$ , тобто двійкового числа в ДРЛ, здійснюється подачею імпульсної послідовності на один із його входів (прямий або зворотній). Одночасне управління обома входами ДРЛ неможлива і рівноцінна відсутності сигналів на обох входах.

Функціонування регулятора ілюструє блок схема на рис. 1, яка складається з описаних нижче блоків. Блок установки стабілізованої напруги і корегування поточного значення кута управління (Б1 на рис. 1) утворюють: ДРЛ, в якому двійковим кодом записано поточне значення кута управління  $\alpha$ ; генератор імпульсів Г1; логічні схеми «max» та «min» для обмеження діапазону регулювання кута  $\alpha$  (сигнали з їхніх виходів забороняють імпульси з генератора на лічильні входи ДРЛ у разі досягнення в ньому чисел, відповідних границям діапазону регулювання).

Блок логічного керування (Б2 на рис.1) до якого належи тать логічні схеми «1» та «2» (знімають сигнал заборони з певного входу ДРЛ коли сигнал з компаратора К за межами зони нечутливості) і логічні схеми «3» та «4» (фіксують стан тригерів і формують сигнал для спрацювання «1» та «2»).

Блок формування зони нечутливості (Б3 на рис. 1) куди входять: двійковий лічильник ДЛ; генератор імпульсів Г2; логічні схеми «max» та «min» (визначають границі зони нечутливості); тригери Т1-Т4, зміна стану яких призводить до зміни двійкового коду ДРЛ, відповідного зміні кута управління  $\Delta\alpha$ .

Блок порівняння вихідної напруги інвертора  $u_{\text{вих}}$  з опорною напругою (Б4 на рис.1), що має такий склад: аналого-цифровий перетворювач АЦП (перетворює змінну вихідну напругу  $u_{\text{вих}}$  інвертора на пропорційну постійну напругу  $u_x$  і узгоджує її рівень з напругою розгортки  $u_p$ ); генератор пилкоподібної напруги розгортки ГПН; компаратор К (порівнює напруги  $u_x$  та  $u_p$  і видає сигнал у момент їхньої рівності). Крім того, регулятор містить логічну схему для порівняння сигналів (ПС), які надходять у ПС від лічильників ДРЛ і ДЛ. Сигнали, які з'являються на виході «а» лічильника ДРЛ у момент встановлення в ньому «0» і сигнали, які з'являються на виході «б» при збіганні чисел у схемі порівняння ПС, використовують для формування імпульсів управління.

Перебіг процесі у такому регуляторі проілюстровано на рис. 2. За початковий прийнято момент періодичного встановлення в ДЛ значення «0». У вказаний момент з входу «а» ДЛ знімається синхроімпульс (рис. 2,б), який приводить елементи блоку формування зони нечутливості у початковий стан: тригери Т1, Т3 – у стан «1» (синхроімпульс подано на входи S), (рис. 2, е, з); тригери Т2, Т4 – у стан «0» (синхроімпульс подано на входи R), (рис. 2, ж, і); на виходах логічних схем «3» та «4» встановлено «0» (сигнал заборони). Далі відбувається формування зони нечутливості. Імпульсна послідовність з генератора Г2, що поступає на вхід ДЛ, збільшує в ньому поточне значення числа до максимального значення, обмеженого кількістю розрядів лічильника. У момент, коли поточне число досягає значення С1 (відповідає уставці максимального рівня вихідної напруги) логічна схема «max» формує сигнал, що встановлює тригер Т2 у стан «1». У такий спосіб логічні схеми «min» та «max» на виході ЛС виділяють з числової послідовності у вигляді сигналів числа С1 та С2, які визначають границі зони нечутливості  $Z=C1 \div C2$  (рис. 2, г, д).

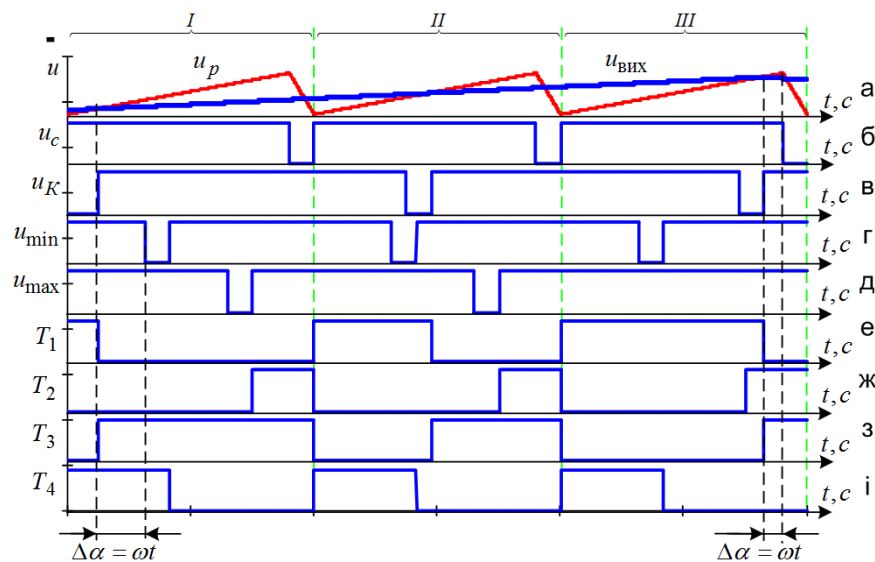


Рисунок 2 – Часові діаграми автоматичного регулятора-стабілізатора вихідної напруги автономного інвертора

З моменті встановлення у ДЛ числа «0» генератор пилкоподібної напруги починає формувати з нуля напругу розгортки, яка подається на компаратор К. У компараторі, куди одночасно поступають напруга

розгортки  $u_p$  і напруга  $u_x$  з виходу АЦП, у момент їх рівності формується установочний сигнал  $u_k$  (рис. 2, в), який надходить на вхід R тригера Т1 та вхід S тригера Т3. Відповідно стан тригера Т1 змінюється з «1» на «0», а стан Т3 навпаки – з «0» на «1». Таким чином, автоматичний регулятор спрацьовує, коли сигнал з компаратора надходить поза зоною нечутливості, яка обмежена сигналами з логічних схем «max» і «min».

Якщо вихідна напруга відповідає «нормі» і не потребує регулювання, то сигнал з компаратора попадає у часовий інтервал між сигналами з логічних схем «max'» та «min'», тобто у зону нечутливості. Оскільки у цій зоні немає збігу станів «1» тригерів Т1 і Т2 або Т2 і Т4, то логічні схеми «3», «4» зберігають сигнали заборони на обох входах ДРЛ; відповідно записаний у ньому кодовим числом кут керування транзисторів залишається незмінним. Функціонування автоматичного регулятора починається з моменту відхилення значень вихідної напруги від «норми». Якщо вихідна напруга нижче «норми» то сигнал з компаратора випереджає у часі сигнал зі схеми «min» і переводить тригер Т3 у стан «1», в якому перебуває тригер Т4. На збіг станів «1» тригерів Т3, Т4 реагує логічна схема «4» і видає сигнал на вхід логічної схеми «2», що знімає заборону з входу зворотного відліку ДРЛ. На даний вхід з генератора Г1 поступає імпульс на послідовність, яка зменшує записане у ДРЛ число (поточний кут керування вентилів) і тим самим збільшує вихідну напругу. Процес триває до появи сигналу з логічної схеми «min'», який переводить тригер Т4 у стан «0». У цей момент на виході логічної схеми «4» встановлюється «0» і відповідно виникає сигнал заборони на вході «-1» ДРЛ. Підвищення вихідної напруги до значення «норма» відбувається без участі тригерів Т1, Т2, які перебувають у стані «0». Черговий у часі імпульс, виданий схемою «max'» переводить тригер Т2 у стан «1». Якщо значення вихідної напруги перевищує норму, то сигнал компаратора з'являється пізніше у часі, ніж сигнал зі схеми «max'». Тоді у стані «1» одночасно опиняються тригер Т1 (під дією синхроімпульсу) і тригер Т2 (під дією сигналу схеми «max'»), що фіксує логічна схема «3» і видає сигнал, який знімає заборону з входу прямого відліку ДРЛ. Імпульси, які поступають з генератора Г1 на вхід «+1» ДРЛ, збільшують записане у ньому число (кут керування вентилів), внаслідок чого зменшується вихідна напруга. Процес припиняє сигнал компаратора, який переводить тригер Т1 у стан «0». З викладеного випливає наступне: у даному регуляторі-стабілізаторі напруги перетворення аналогової інформації (вихідної напруги) у цифрову полягає у тому, що часовий інтервал збігання «одиночних станів» тригерів Т1 і Т2 або тригерів Т3 і Т4 перетворюється у зміну двійкового коду ДРЛ, відповідного зміні кута керування вентилів.

#### Висновки

Розглянутий автоматичний регулятор-стабілізатор характеризується високою точністю стабілізації напруги, яка за відсутності аналогової ланки не залежить від вибору і ретельного налаштування прецизійних елементів, а визначається стабільністю ГПП і шириною зони нечутливості. Широка зона нечутливості у часі може бути обрана достатньо малою, оскільки за даної частоти  $f$  повністю визначається розрядністю  $n$  лічильників ДРЛ і ДЛ:

$$t_{3H} = \frac{|C_1 - C_2|}{2^{n+1} \cdot f}.$$

Регулювання напруги перетворювача здійснюється зміною установки рівня, пов'язаною зі зсувом зони нечутливості. Швидкість відпрацювання заданого кута регулювання залежить від частоти слідування імпульсів генератора Г1, яка обмежується тільки частотними властивостями інтегральних мікросхем.

На кафедрі теоретичної електротехніки [4] Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» був виготовлений експериментальний зразок описаного регулятора-стабілізатора і проведені лабораторні випробування його сумісної роботи з автономним інвертором напруги ( $P=4$  кВт,  $f=400$  Гц). Дослідження показали, що при розрядності лічильників  $n=8$ , рівності частот  $f_1$  і  $f_2$  генераторів Г1 і Г2, мінімальній ширині зони нечутливості

$t_{3H} = \frac{1}{f_1} = \frac{1}{f_2}$  і зміні навантаження від номінального до неробочого ходу точність стабілізації вихідної

напруги інвертора складала 0.5%.

#### Список використаної літератури

1. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти: монографія. Київ, 2020, 300 с.
2. Островерхов М.Я., Сенько В.І., Чибеліс В.І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Київ, 2019, 248 с.
3. Колонтасівський Ю.П., Тугай Д.В. Перетворювальна техніка і нетрадиційні та відновлювальні електроенергетиці: навч. посібник. Харків, 2019, 67 с.
4. [https://toe.fea.kpi.ua/laboratory\\_tasks\\_02.html](https://toe.fea.kpi.ua/laboratory_tasks_02.html)

V. Grudska, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0002-7775-6397  
V. Chybelis, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0003-2235-9826  
V. Lobodzinskiy, PhD in Technical Sciences, assistant professor, **ORCID** 0000-0003-1167-824X  
**National technical university of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

## **RESEARCH OF THE AUTOMATIC REGULATOR OF THE INPUT VOLTAGE STABILIZER OF AN AUTONOMOUS INVERTER**

*This article presents the results of the study of the automatic regulator of the stabilizer. In the work, the study of the output voltage of an autonomous inverter was carried out by introducing a digital form of setting the insert of a stabilized voltage and a digital form of comparison with a reference voltage. The achieved high accuracy of voltage stabilization does not depend on the choice and careful adjustment of the elements. This made it possible to achieve stability of the voltage generator and the width of the sensitivity zone. The voltage regulation of the converter is carried out by changing the level setting associated with the shift of the insensitivity. The speed of development of a given control angle depends on the pulse repetition rate of the generator, which is limited only by the frequency properties of integrated circuits. Improvement of the control system of the autonomous inverter made it possible to increase the accuracy of stabilization of the output voltage of the inverter, which made it possible to simplify the adjustment of the control system for easy coordination with other software elements. Studies have shown that the voltage regulation of the converter is carried out by changing the level setting associated with a shift in the dead zone. The speed of development of a given control angle depends on the pulse repetition rate of the generator, which is limited only by the frequency properties of integrated circuits. And with the equality of the frequencies of the pulse generators, the minimum width of the dead zone and the change in the load from nominal to no-load, the stabilization accuracy of the output voltage of the inverter was 0.5%.*

**Keywords:** autonomous inverter, stabilization, output voltage, automatic control, phase-pulse control

### **REFERENCES**

1. V.I.Senko, K.V.Trubitsyn, and V.I.Chybelis, "Inverters and frequency converters: monograph," *Kiev*, pp. 300. 2020.
2. M.Ia.Ostroverkhov, V.I.Senko, and V.I.Chybelis, "Impulse converters stabilizing voltage," *Kiev*, pp. 248. 2019.
3. Yu.P.Kolontaievskiy, D.V.Tuhai, "Conversion technology in unconventional and innovative energy," *Kharkov*, pp. 67. 2019.
4. [https://toe.fea.kpi.ua/laboratory\\_tasks\\_02.html](https://toe.fea.kpi.ua/laboratory_tasks_02.html)

Надійшла 17.12.2020  
Received 17.12.2020