

## ЕЛЕКТРИЧНІ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.317

### АНАЛІЗ СТАТИКИ СТАБІЛІЗАТОРІВ ОСНОВНОЇ ГАРМОНІКИ В ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ МЕРЕЖІ

**Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук, **С.Ю. Пронзалева**, канд. техн. наук, **Р.М. Мороз**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: moroz320@yandex.ua

*Розглянуто замкнуті структури стабілізованих джерел змінного струму. Визначено вплив параметрів тракту корекції схем стабілізаторів вихідних сигналів. Запропоновано коригування структурної схеми стабілізованого джерела основної гармоніки у діапазоні частот шляхом введення в тракт корекції регульованого селективного підсилювача. Бібл. 4, рис. 7.*

**Ключові слова:** електроенергія, показники якості, точність, джерело струму, підсилювач.

Створення засобів метрологічного забезпечення приладів контролю величин показників якості електроенергії (ПЯЕ) неможливе без побудови прецизійної симетричної трифазної системи напруг основної гармоніки та відтворення на її основі самих показників якості. В свою чергу, досягнення високого рівня симетрії неможливе без стабілізації всіх векторів трифазної системи напруг.

У роботі [1] показано, що для побудови калібраторів найбільш перспективними є стабілізовані джерела амплітуди змінного струму (СДАЗС) з замкнутою структурною схемою і з регулюванням по відхиленню вихідного сигналу в навантаженні. У таких схемах основними джерелами похибок є напруга задавального генератора, часова та температурна нестабільності опорної напруги [2] і її подільника, який розташований на його виході. Знизити похибку амплітудного значення струму чи напруги вдається в схемах, в яких опорним сигналом є періодична напруга прямокутної форми, сформована з синусоїдальної, що стабілізується шляхом обмеження останньої на певному рівні [3].

Тому в кожному каналі такої трифазної системи напруг доцільно використовувати стабілізатори з мультиплікативною корекцією похибки підтримання амплітуд напруги та струму в навантаженні, структурна схема якого показана на рис. 1.

До її складу входять задавальний генератор (ЗГ), підсилювач з керованим коефіцієнтом (ПКК) номінального струму живлення в нормальних умовах, підсилювач потужності (ПП), джерело опорної напруги (ДОН), в якому за допомогою джерела стабільної постійної напруги та підсилювача-обмежувача формується опорний прямокутний сигнал  $U_7$ , віднімаючий пристрій (ВП), селективний пристрій (СП), фазочутливий детектор (ФД), фільтр нижніх частот (ФНЧ). Принцип роботи структури, побудованої за схемою мультиплікативної корекції похибки стабілізації амплітудного значення струму в навантаженні, заснований на виділенні сигналу, пропорційного відхиленню струму в навантаженні за допомогою його порівняння зі змінним опорним сигналом і подальшим синхронним детектуванням результуючого сигналу, який використовується для керування коефіцієнтом передачі підсилювача. Зміна коефіцієнта відбувається доти, поки струм живлення в навантаженні не відповідатиме його номінальному значенню.

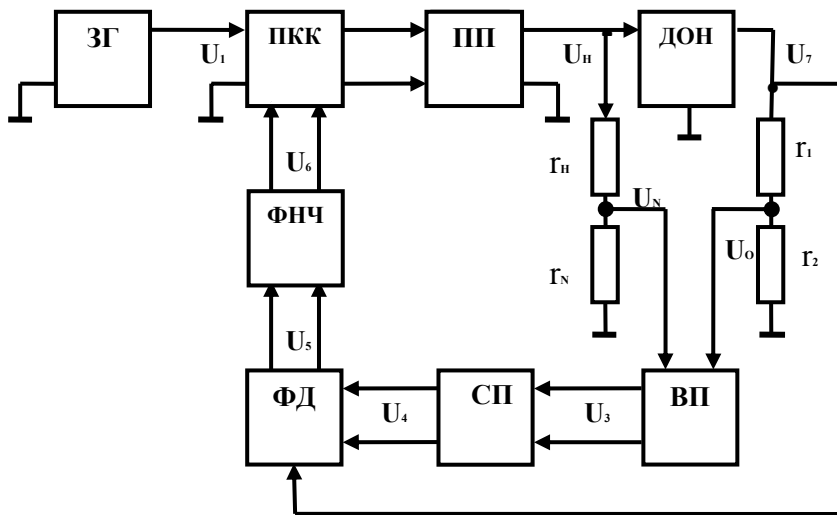


Рис. 1

в навантаженні та їх позначення згідно з рис. 1. Для проведення статичного аналізу схем з мультиплікативною корекцією похибки визначимо основну систему рівнянь статички схеми та коефіцієнт стабілізації. Запишемо основні співвідношення, що характеризують роботу стабілізованого джерела струму з мультиплікативною корекцією похибки в статичному режимі:

$$\left. \begin{aligned} I_H &= \frac{U_1 K_{ПП} (K_0 + K_{01} U_6)}{r_\Sigma} \\ U_6 &= (U_0 - U_N) K_{ТП} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $K_{ПП}$  – коефіцієнт передачі підсилювача потужності;  $K_0$  – коефіцієнт передачі підсилювача з керованим коефіцієнтом у нормальних умовах;  $r_\Sigma = r_H + r_N + r_i$  – сумарний опір;  $r_i$  – вихідний опір підсилювача потужності;  $r_i \gg r_H + r_N$ , де  $r_H$  – опір навантаження;  $r_N$  – взірцевий опір;  $K_{01} U_6$  – зміна коефіцієнта передачі ПКК залежно від відхилень струму  $I_H$  в навантаженні під впливом напруги  $U_6$  керування;  $U_0$  – опорна напруга на виході подільника  $r_1/r_2$ ;  $U_N$  – напруга на взірцевому резисторі  $r_N$ ;  $K_{ТП} = K_{ВП} K_{СП} K_{ФД} K_{ФНЧ}$  – коефіцієнт передачі тракту порівняння (ТП), що дорівнює результату перемноження коефіцієнтів передачі віднімаючого пристрою  $K_{ВП}$ , селективного пристрою  $K_{СП}$ , фазочутливого детектора  $K_{ФД}$  та фільтра нижніх частот  $K_{ФНЧ}$ ;  $K_{ПП} (K_0 + K_{01} U_6)$  – коефіцієнт передачі основного тракту підсилювача потужності з урахуванням керованого коефіцієнта ПКК. Зазначимо, що основний тракт складається з ЗГ, ПКК, ПП (рис. 1).

Ця система рівнянь описує роботу стабілізованого джерела струму з мультиплікативною корекцією похибки у статичному режимі.

Вирішимо систему рівнянь (1) відносно струму в навантаженні  $I_H$ :

$$I_H = \frac{K'_0 + K'_{01} U_7 K_{П} K_{ТП}}{r_\Sigma + U_1 K'_{01} r_N K_{ТП}} U_1, \quad (2)$$

де  $K'_0 = K_0 K_{ПП}$  – коефіцієнт передачі підсилювача потужності;  $K'_{01} = K_{01} K_{ПП}$  – прирощення коефіцієнта передачі підсилювача при відхиленні струму в навантаженні  $I_H$ ;  $K_{П}$  – коефіцієнт передачі подільника:  $K_{П} = r_2 / (r_1 + r_2)$ .

Основними джерелами похибки цієї схеми є нестабільність вихідної напруги задавального генератора синусоїдального сигналу, нестабільність опору навантаження, часова нестабільність, температурна нестабільність та нестабільність зразкового опору.

Проведемо аналіз статички джерел струму, використовуючи схеми для стабілізації амплітуди змінного струму

Якщо коефіцієнт передачі тракту порівняння наближається до нескінченності  $K_{\text{ТП}} \rightarrow \infty$ , що відповідає номінальному значенню коефіцієнта передачі основного тракту, рівняння (2) набуває вигляду

$$I_{\text{H}} = \frac{U_7 K_{\text{П}}}{r_{\text{N}}} = \frac{U_1 K'_0}{r_{\text{N}}}. \quad (3)$$

З рівнянь (1), (2) випливає, що збільшення  $K_{\text{ТП}}$  призведе до наближення вихідної напруги  $U_1$  до значення  $U_7$  підсилювача-обмежувача з коефіцієнтом передачі  $K_{\text{П}}$  подільника напруги ( $r_1, r_2$ ). Це еквівалентно зменшенню залежності значення  $I_{\text{H}}$  від нестабільності значень схеми СДАЗС, опору навантаження  $r_{\text{H}}$  і вихідного сигналу задавального генератора.

Визначимо коефіцієнт  $K_{\text{ст}}$  стабілізації СДАЗС, яке аналізуємо. Під  $K_{\text{ст}}$  слід розуміти частку від ділення відносної зміни струму в навантаженні до відносного значення параметра, що викликало цю зміну. На основі виразів (1) та (2) прирощення струму  $\Delta I_{\text{H}}$  в навантаженні, спричиненому нестабільністю коефіцієнта передачі основного тракту, буде наступним:

$$\Delta I_{\text{H}} = \frac{[(K'_0 + \Delta K'_0) + K'_{01} U_7 K_{\text{П}} K_{\text{ТП}}] U_1}{r_{\Sigma} - U_1 K'_{01} r_{\text{N}} K_{\text{ТП}}} - \frac{U_7 K_{\text{П}}}{r_{\text{N}}} = \frac{\Delta K'_0 U_1}{r_{\Sigma} - U_1 K'_{01} r_{\text{N}} K_{\text{ТП}}}. \quad (4)$$

Якщо представити відносну похибку як відношення прирощення  $\Delta I_{\text{H}}$  струму в навантаженні до його дійсного значення  $I_{\text{H}}$ , для її визначення можна отримати такий вираз:

$$\gamma_I = \frac{\Delta I_{\text{H}}}{I_{\text{H}}} = \frac{\Delta K'_0 / K'_0}{1 + U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma}}. \quad (5)$$

Тоді коефіцієнт стабілізації основного тракту можна представити у вигляді

$$K_{\text{ст}} = 1 + U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma} \approx U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma}. \quad (6)$$

Визначимо коефіцієнт стабілізації відносно вхідної напруги  $U_1$  задавального генератора:

$$\Delta I_{\text{H}}^{U_1} = \frac{(K'_0 + K'_{01} U_7 K_{\text{П}} K_{\text{ТП}})(U_1 + \Delta U_1)}{r_{\Sigma} + K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}}(U_1 + \Delta U_1)} - \frac{U_7 K_{\text{П}}}{r_{\text{N}}} = \frac{\Delta U_1 / U_1}{r_{\Sigma} + K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}}(U_1 + \Delta U_1)}; \quad (7)$$

$$\gamma_I^{U_1} = \frac{\Delta U_1 / U_1}{1 + U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma}}; \quad (8)$$

$$K_{\text{ст}}^{U_1} = 1 + U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma} \approx U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma}. \quad (9)$$

Оскільки  $r_i \gg r_{\text{H}} + r_{\text{N}}$ , визначимо коефіцієнт стабілізації не відносно зміни значення опору навантаження, а відносно його прирощення:

$$\Delta I_{\text{H}}^{r_{\Sigma}} = \frac{(K'_0 + K'_{01} U_7 K_{\text{П}} K_{\text{ТП}}) U_1}{(r_{\Sigma} + \Delta r_{\Sigma}) + K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} U_1} - \frac{U_7 K_{\text{П}}}{r_{\text{N}}} = \frac{\Delta r_{\Sigma} U_1 K'_0}{r_{\Sigma} [(r_{\Sigma} + \Delta r_{\Sigma}) + K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} U_1]}; \quad (10)$$

$$\gamma_I^{r_{\Sigma}} = \frac{\Delta r_{\Sigma} / (r_{\Sigma} + \Delta r_{\Sigma})}{1 + U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / (r_{\Sigma} + \Delta r_{\Sigma})}; \quad (11)$$

$$K_{\text{ст}}^{r_{\Sigma}} = 1 + U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / (r_{\Sigma} + \Delta r_{\Sigma}) \approx U_1 K'_{01} K_{\text{ТП}} r_{\text{N}} / r_{\Sigma}. \quad (12)$$

Вирази співпали, значить, тракт порівняння рівною мірою знижує дію раніше перелічених дестабілізуючих факторів на значення амплітуди струму в навантаженні.

Але в цій структурі не враховується ще один фактор впливу. Річ у тім, що селективний підсилювач з високою добротністю має на частоті резонансу надзвичайно стрімкі амплі-

тудно-частотну (АЧХ) і фазочастотну характеристики (ФЧХ), як показано на рис. 2 і 3 відповідно.

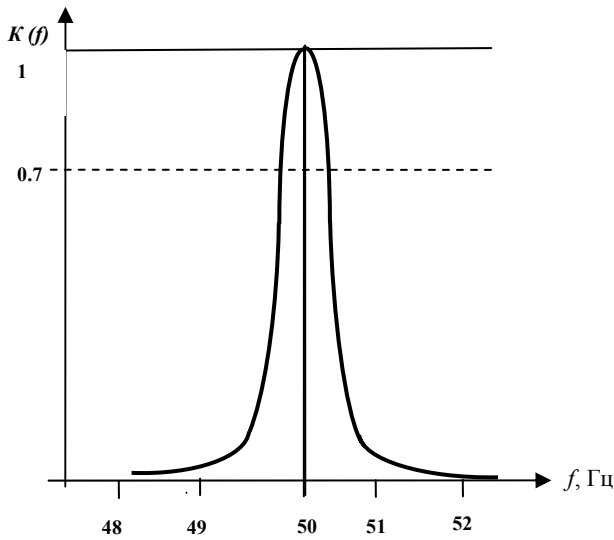


Рис. 2

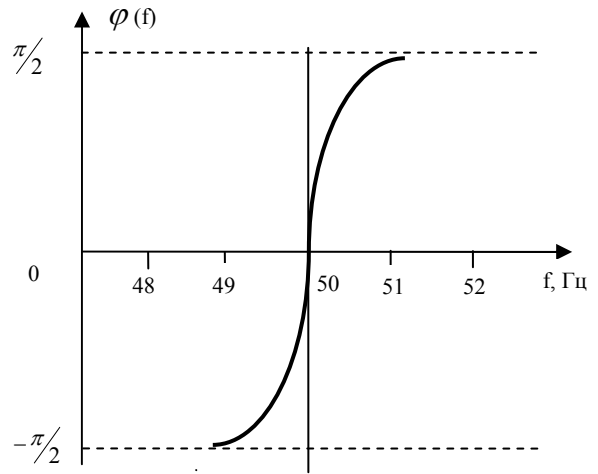


Рис. 3

Це призводить до різкого зниження коефіцієнта стабілізації з відхиленням робочої частоти від номінального значення, оскільки він напряму залежить від коефіцієнта  $K_{ТП}$ , що витікає з виразу (6).

А наявність ФД, який також стрімко реагує на зміну кута зсуву фаз сигналу у каналі стабілізації, подвоює зазначений ефект. Фактично, маємо високу стабільність вихідного сигналу тільки на номінальній частоті.

Уникнути цього явища можливо шляхом введення в канал порівняння структурної схеми, представлені на рис. 1, додаткових пристроїв. У цю схему додатково введено перетворювач частоти в код (ПЧК) і регульований селективний підсилювач (РСП) замість (СП) (рис. 4).

Принципова схема РСП разом з ПЧК представлена на рис. 5. Вона включає селективний підсилювач на основі змінних стану і схему управління, яка об'єднує два масштабних перетворювача МП1, МП2, два цифроаналогових перетворювача ЦАП1 і ЦАП2 та виконавчий пристрій (ВП). Селективний підсилювач складається з операційних підсилювачів  $У1...У3$  та елементів корекції  $R1...R8, C1, C2$ .

Код, пропорційний відхиленню частоти мережі, надходить з ПЧК на ВП, де за-

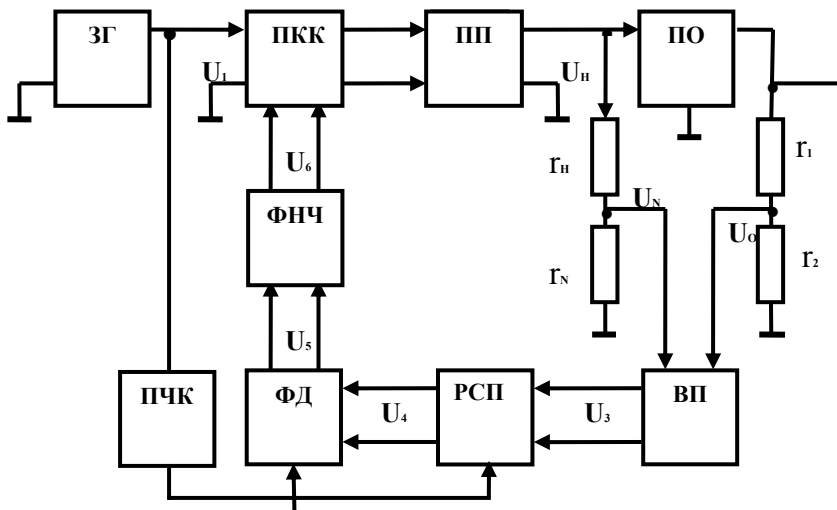


Рис. 4

пам'ятовується в кінці кожного періоду сигналу мережі і подається на цифрові входи обох ЦАП. На аналогові входи ЦАП підводяться вихідні сигнали 1- і 2-го каскадів селективного підсилювача.

Якщо частота мережі має номінальне значення 50 Гц, код ПКЧ дорівнює нулю і вихідні сигнали обох ЦАП відсутні. З появою відхилень частоти з'являються певний код на цифрових входах ЦАП1, ЦАП2 та відповідні зна-

чення їх вихідних сигналів, які підсумовуються з вихідними сигналами 1- і 2-го каскадів селективного підсилювача і тим самим настроюють його на частоту резонансу. Завдяки цьому в АЧХ і ФЧХ регульованого селективного підсилювача з'являються ділянки з незмінними коефіцієнтом передачі і кутом зсуву фаз вихідного сигналу у полосі регулювання, як показано на рис. 6 і 7 відповідно.

Таким чином, додаткове введення в структурну схему (рис. 1) ПЧК і РСП дає змогу забезпечити високу стабільність сигналів основної гармоніки у розширеному діапазоні частот мережі. Подібного результату можна досягти і в схемах стабілізаторів з адитивною корекцією. Розроблений стабілізатор вже використовується у високочастотних вимірювальних засобах.

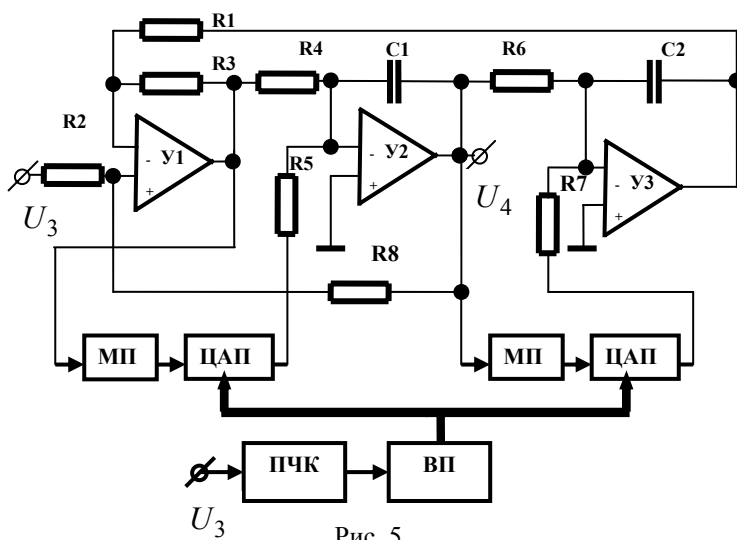


Рис. 5

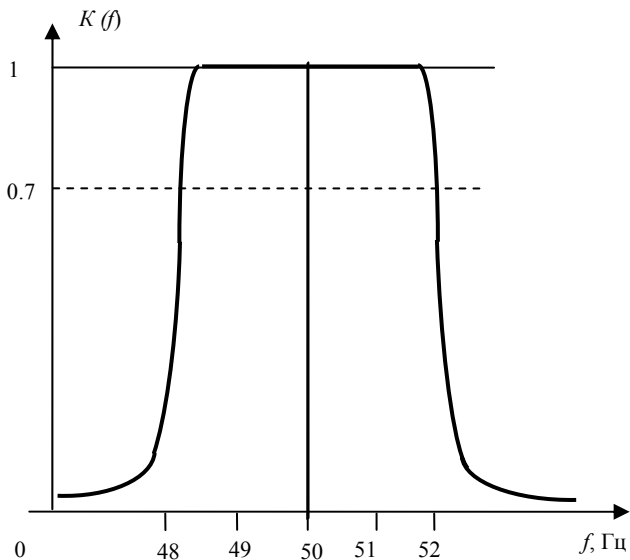


Рис. 6

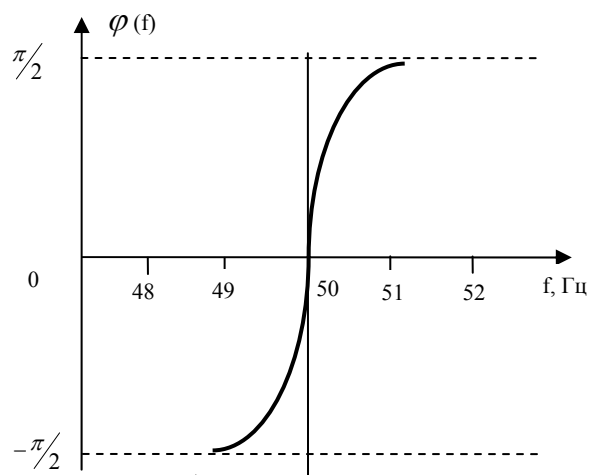


Рис. 7

**Висновки.** Завдяки зусиллям по створенню стабілізаторів змінного струму Україна має єдиний в СНД робочий еталон показників якості електричної енергії, нестабільність вихідних фазних напруг якого в розширеному діапазоні частот складає 0,001 %.

Основні метрологічні характеристики стабілізатора:

номінальний струм навантаження, А .....	0,15
діапазон частот основної гармоніки, Гц .....	30...70
коефіцієнт нелінійних спотворень, % .....	0,1
припустима нестабільність параметрів основного та коригуючого ланцюгів та навантажень, % .....	10
коефіцієнт стабілізації .....	4000
похибка відтворення амплітуди синусоїдального сигналу, %.....	0,01
час встановлення, с .....	0,5
номінальний опір навантаження, Ом.....	1500
номінальні значення вихідних напруг, В.....	100, 380.

Порівняння характеристик розробленого стабілізатора з еталоном-калібратором електричної потужності 6101А відомої компанії Fluke [4] демонструє переконливу перевагу пропонуємого стабілізатора як за ціною, так і за точністю відтворення ПЯЕ.

1. *Пронзелева С.Ю.* Прецизійні стабілізатори амплітуди синусоїдального сигналу // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 4. – С. 75–78.
2. *А. с. 329636 СРСР.* Стабілізатор змінного струму / Б.А. Маршаленко, А.І. Рудой, С.Г. Таранов – Опубл. 1972, Бюл. № 7.
3. *А. с. 262995 СРСР.* Стабілізоване джерело амплітуди змінного струму / С.Г. Таранов, В.В. Брайко, Б.А. Маршаленко. – Опубл. 1970, Бюл. № 7.
4. *Fluke Corporation.* Printed in United Kingdom by Graphics Master Ltd. 09/2002 1779013-B-ENG-N A.DS264.

УДК 621.317

**Ю.Ф. Тесик**, докт. техн. наук, **С.Ю. Пронзелева**, канд. техн. наук, **Р.Н. Мороз**

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Анализ статистики стабилизаторов основной гармоники в диапазоне частот сети**

*Рассмотрены замкнутые структуры стабилизированных источников переменного тока. Определено влияние параметров тракта коррекции схем стабилизаторов выходных сигналов. Предложены корректировки структурной схемы стабилизированного источника основной гармоники в диапазоне частот путем введения в тракт коррекции регулируемого селективного усилителя. Библ. 4, рис. 7.*

**Ключевые слова:** електроенергія, показателі якості, точність, джерело струму, усилитель.

**Yu.F. Tesik, S.Yu. Pronzeleva, R.N. Moroz**

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

**Analysis of static stabilizers of the fundamental harmonic frequencies in the range of the network**

*Closed structures of stabilized AC sources are considered. Influence of parameters of the circuits of correction tract of stabilizers of outputs signals is defined. Correction of block diagram of stabilized source of the fundamental harmonic in a frequency range by help of implementation a controlled selective amplifier in channel of correction is proposed. References 4, figures 7.*

**Key words:** generator-calibrator, electric power energy, indexes of quality, accuracy, amplifier.

Надійшла 22.08.2016

Received 22.08.2016

УДК 621.314

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОЛЬТОДОДАВЧИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З СЕКЦІОНОВАНИМИ ОБВИТКАМИ У СКЛАДІ СТАБІЛІЗАТОРА НАПРУГИ ЗМІННОГО СТРУМУ**

**К.О. Липківський**, докт. техн. наук, **А.Г. Можаровський**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна  
e-mail: lypkivskyk@ukr.net

*Трансформуючі елементи (ТЕ) з секціонуванням обвиток у системах перетворювальної техніки беруть безпосередню участь у реалізації основного функціонального перетворення. Такий клас ТЕ має низку особливостей, які були враховані у розробленій авторами методології їхнього розрахунку та проектування. У цій роботі таку методологію застосовано для розрахунку вольтододавчих трансформаторів з секціонуванням обвиток, що характеризуються багатоваріантністю виконання, у складі стабілізатора напруги змінного струму. При цьому отримано суттєве підвищення ефективності використання таких трансформуючих елементів за рахунок варіювання густини струму секцій обвиток. Бібл. 11, рис. 5, табл. 3.*