



УКРАЇНА

(19) UA (11) 62286 (13) A

(51) 7 H02P9/44

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ  
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ  
ВЛАСНОСТІОПИС  
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ  
НА ВІНАХІДВидається під  
відповідальність  
власника  
патенту

(54) ГЕНЕРАТОРНЕ ДЖЕРЕЛО ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1

2

(21) 2003021633

(22) 25 02 2003

(24) 15 12 2003

(46) 15 12 2003, Бюл. № 12, 2003 р

(72) Ткачук Василь Іванович, Копчак Богдан Любомирович

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

(57) Генераторне джерело електроенергії, що містить асинхронну машину з силовими виводами, під'єднаними до конденсаторної батареї початкового збудження, навантаження, входних виводів блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем, силових входів керованого вентильного компенсаційного перетворювача, виконаного за мостовою схемою, і задавач напруги генераторного

джерела електроенергії, яке відрізняється тим, що додатково містить регулятор струму, вихід якого під'єднаний до керуючого входу блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем, а його перший вхід сполучений з виходом задавача початкового струму керованого вентильного компенсаційного перетворювача, другий під'єднаний до виходу давача струму навантаження керованого вентильного компенсаційного перетворювача, а третій сполучений з виходом блока обмеження, вхід якого під'єднаний до виходу регулятора напруги, перший вхід якого сполучений з виходом задавача напруги генераторного джерела електроенергії, а другий під'єднаний до виходу давача напруги генераторного джерела електроенергії, входи якого під'єднані до силових виводів асинхронної машини

Винахід відноситься до області електротехніки, зокрема до автономних джерел живлення на базі асинхронної машини (АМ) зі самозбудженням

Відоме генераторне джерело електроенергії (ГДЕ), що містить асинхронну машину, конденсаторну батарею, навантаження, тиристорний компенсатор реактивної потужності (ТКРП), блок імпульсно-фазового керування (БІФК) тиристорного компенсатора реактивної потужності і задавач напруги генераторного джерела електроенергії (А С 1467734 СССР Генераторный источник электроэнергии / М Л Костырев, А Н Штанов, Н В Мотовилов и В Н Корицкий Оpubл в Б И, 1989, №11)

Однак даному генераторному джерелу електроенергії властива низька точність регулювання вихідної напруги, а також завищена встановлена потужність конденсаторної батареї, що дорівнює сумі реактивної потужності, яку споживають асинхронна машина і навантаження, а потужність ТКРП становить  $\approx 80\%$  від потужності конденсаторної батареї. В результаті встановлена потужність такого регульованого джерела реактивної енергії в 3,5 - 5 разів перевищує потужність АГ. Крім цього в режимі малих і середніх навантажень зростають втрати в генераторному джерелі електроенергії, що призводить до зниження його коефіцієнта корисної

дії, а також зростають комутаційні спотворення вихідної напруги

З відомих генераторних джерел електроенергії найближчим до того, що заявляється, є генераторне джерело електроенергії, що містить асинхронну машину зі силовими виводами, під'єднаними до конденсаторної батареї початкового збудження, навантаження, входних виводів блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем, силових входів керованого вентильного компенсаційного перетворювача (КВКП), виконаного за мостовою схемою і задавач напруги генераторного джерела електроенергії (Патент України №26222 Генераторне джерело живлення / І М Чиженко, О І Чиженко, В Я Лісник, І В Волков - Оpubл в Бюл 1999, №4)

Однак реалізований у даному генераторному джерелі електроенергії спосіб регулювання напруги допускає в процесі роботи значну статичну і динамічну похибки, особливо в режимах стрибкоподібної зміни навантаження. Причиною цього є те, що регулювання напруги здійснюється без застосування додаткового регулятора напруги, а реалізується шляхом порівняння, в спеціально розробленому для такого джерела блоці імпульсно-фазового керування, вихідної напруги АМ і заданої величини опорної напруги, яка формується задавачем напруги

(19) UA (11) 62286 (13) A

ги генераторного джерела електроенергії. Зміна амплітуди напруги АМ приводить до відповідної зміни кута відкривання тиристорів КВКП, що приводить до зміни струму його навантаження (відповідного керування реактивної потужності) і таким чином відбувається регулювання напруги на виході ГДЕ. Спотворення напруги на виході ГДЕ, тобто її відхилення від синусоїдальної, суттєво вплине на симетрію імпульсів керування тиристорами КВКП, що, в свою чергу, призведе до зростання статичної похибки регулювання напруги.

У даному ГДЕ має місце також значна інерційність регулювання струму навантаження КВКП (струму дроселя), так як стала часу  $T_k$  його кола навантаження є значною і залежить від параметрів дроселя. Причиною цього є відсутність окремого контуру регулювання струму, призначеного для компенсування сталої часу  $T_k$ , що також негативно впливає на динамічну похибку регулювання напруги.

Крім цього, в генераторному джерелі електроенергії не передбачено обмеження струму КВКП в динамічних режимах, в зв'язку з чим можливе аварійне його відмикання при перевищенні струмом КВКП допустимого значення, а такі режими є можливими, бо на вихід КВКП, який є регульованим джерелом реактивної потужності, ввімкнено дросель, тому КВКП працює в режимі близькому до короткого замикання.

Відсутність у зазначеному відомому ГДЕ окремих контурів для ефективного регулювання його напруги та струму керованого вентильного компенсаційного перетворювача, а також обмеження максимального значення цього струму КВКП на допустимому рівні є причиною невисокої динамічної та статичної точності регулювання напруги ГДЕ, що негативно впливає на показники якості його напруги, знижує надійність електропостачання і погіршує техніко-економічні показники і надійність функціонування електроспоживачів зі спільною точкою підмикання до такого генераторного джерела електроенергії.

В основу винаходу поставлено завдання створення такого генераторного джерела електроенергії, в якому, завдяки введенню додаткових контурів регулювання напруги ГДЕ і струму КВКП досягаються б значне зменшення статичної та динамічної похибки регулювання напруги, а також забезпечувалося б обмеження струму КВКП на допустимому рівні, в зв'язку з чим підвищувалися б показники якості напруги та надійність енергопостачання генераторного джерела електроенергії, а також техніко-економічні показники функціонування електроспоживачів зі спільною точкою підмикання до генераторного джерела електроенергії.

Поставлене завдання досягається тим, що генераторне джерело електроенергії, що містить асинхронну машину зі силовими виводами, під'єднаними до конденсаторної батареї початкового збудження, навантаження, вхідних виводів блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем, силових входів керованого вентильного компенсаційного перетворювача, виконаного за мостовою схемою і задавач напруги генераторного джерела електроенергії, згідно винаходу, додатково містить регулятор струму, вихід якого

під'єднаний до керуючого входу блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем, а його перший вхід сполучений з виходом задавача початкового струму керованого вентильного компенсаційного перетворювача, другий під'єднаний до виходу задавача струму навантаження керованого вентильного компенсаційного перетворювача, а третій сполучений з виходом блока обмеження, вхід якого під'єднаний до виходу регулятора напруги, перший вхід якого сполучений з виходом задавача напруги генераторного джерела електроенергії, а другий під'єднаний до виходу задавача напруги генераторного джерела електроенергії, вхід якого під'єднаний до силових виводів асинхронної машини.

Завдяки тому, що у запропонованому джерелі введено окремий контур регулювання струму навантаження КВКП, є можливість компенсувати сталу часу  $T_k$  дроселя, який слугить його навантаженням і забезпечити бажану динаміку регулювання цього контуру, а також реалізувати оперативне обмеження значення струму рівнем, що задається максимально допустимим значенням струму навантаження КВКП і, тим самим, виключити режими аварійного відмикання навантаження КВКП.

Контур регулювання струму підпорядкований зовнішньому контуру регулювання напруги генераторного джерела електроенергії. На вході регулятора напруги порівнюється сигнали заданого і поточного (фактичного) значення напруги генераторного джерела електроенергії, і його вихідний сигнал є керуючим для підпорядкованого йому контуру регулювання струму КВКП. Формування вихідних сигналів регулятора напруги і регулятора струму за відповідними законами дає змогу отримати бажані статичні і динамічні показники регулювання напруги генераторного джерела електроенергії. Блок обмеження обмежує вихідний сигнал регулятора напруги таким чином, щоб сума сигналів задавача початкового струму і регулятора напруги в режимі обмеження, або їх різниця була заданням, відповідно, на максимальний струм навантаження КВКП, який не призводить до аварійного його відмикання і на мінімальний струм навантаження КВКП, якому відповідає максимальна напруга на виході генераторного джерела електроенергії.

Наслідком цього є мінімальна статична та динамічна похибка регулювання напруги генераторного джерела електроенергії при дії збурень в каналах навантаження та швидкості обертання АМ, а також обмеження струму навантаження КВКП на допустимому рівні, в зв'язку з чим знижується імовірність аварійного відмикання КВКП, що підвищує надійність роботи самого генераторного джерела електроенергії, надійність електропостачання, поліпшують показники якості напруги генераторного джерела електроенергії та техніко-економічні показники споживачів зі спільною точкою підмикання до нього.

На фіг 1 показано схему запропонованого генераторного джерела електроенергії.

а на фіг 2-13 - процеси зміни струму КВКП і напруги асинхронної машини, що отримані на фізичній моделі запропонованого генераторного джерела електроенергії в режимах стрибкоподібної зміни сигналу завдання на напругу ГДЕ (фіг 2-7) та стриб-

коподібної зміни активно-індуктивного навантаження на силових виводах ГДЕ (фіг 8-13)

Генераторне джерело живлення містить асинхронну машину 1, конденсаторну батарею початкового збудження 2, навантаження 3, блок імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем 4, керований вентиляційний компенсаційний перетворювач 5, що виконаний за мостовою схемою, регулятор струму 6, задавач початкового струму 7 керованого вентиляційного компенсаційного перетворювача 5, давач струму навантаження 8 керованого вентиляційного компенсаційного перетворювача 5, блок обмеження 9, регулятор напруги 10, задавач напруги генераторного джерела електроенергії 11 та давач напруги генераторного джерела електроенергії 12, причому силові виводи асинхронної машини 1 під'єднані до конденсаторної батареї початкового збудження 2, навантаження 3, входних виводів блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем 4 і силових входів керованого вентиляційного компенсаційного перетворювача 5, керуючий вхід блока імпульсно-фазового керування компенсаційним перетворювачем сполучений з виходом регулятора струму 6, перший вхід якого сполучений з виходом задавача початкового струму 7 керованого вентиляційного компенсаційного перетворювача 5, другий під'єднаний до виходу давача струму навантаження 8 керованого вентиляційного компенсаційного перетворювача 5, а третій сполучений з виходом блока обмеження 9, вхід якого під'єднаний до виходу регулятора напруги 10, перший вхід якого сполучений з виходом задавача напруги 11 генераторного джерела електроенергії, а другий вхід під'єднаний до виходу давача напруги 12 генераторного джерела електроенергії, входи якого під'єднані до силових виводів асинхронної машини 1

Регулювання напруги на затискачах запропонованого генераторного джерела електроенергії виконується двоконтурною системою автоматичного керування. Перший (внутрішній) контур - контур регулювання струму КВКП, включає регулятор струму 6, задавач початкового струму 7 КВКП і давач струму 8 КВКП. Використання цього контуру у запропонованій системі автоматичного керування вихідної напруги генераторного джерела електроенергії дає змогу обмежити струми навантаження КВКП на допустимому рівні, а також отримати бажані показники якості його регулювання у динамічних режимах. Задавачем початкового струму 7 в усталеному режимі роботи генераторного джерела електроенергії встановлюють початкове значення струму КВКП таким чином, щоб при відімкненому регуляторі напруги 10 величина напруги на затискачах асинхронної машини 1 в режимі неробочого ходу дорівнює бажаному значенню (в більшості випадків - це стандартна напруга 3х380В). Величина струму навантаження КВКП залежить від величини ємності конденсаторної батареї 2 і конденсаторів самого КВКП. Вибором типу і параметрів регулятора струму 6 забезпечується бажана статична і динамічна точність регулювання струму навантаження КВКП 5. Якщо застосувати регулятор інтегрального типу (пропорційно - інтегральний або інтегральний), то можна забезпечити астатизм контуру струму, тобто отримати нульову статичну по-

хибку регулювання цього струму. Параметри регулятора струму 6 вибирають з умови компенсації інерційності силового кола навантаження КВКП (основним його інерційним елементом і водночас навантаженням є дросель), що подається сталою часу  $T_K$ . Величина цієї сталої часу  $T_K$  силового кола КВКП для генераторних джерел електроенергії потужністю 4÷55КВт знаходиться в межах 0,02÷0,08с. Необхідна динамічна точність забезпечується шляхом вибору параметрів регулятора струму 6 за обраним критерієм оптимізації контуру струму.

Для забезпечення високої точності регулювання напруги у статичних і динамічних режимах слугить другий (зовнішній) контур - контур регулювання вихідної напруги генераторного джерела електроенергії, який складається з блока обмеження 9, регулятора напруги 10, задавача напруги 11 генераторного джерела електроенергії 5 і давача напруги 12 генераторного джерела електроенергії 5. Давач напруги 10 реалізує зворотний зв'язок за усередненим (середньовипрямленим) значенням трифазної напруги АМ і побудований за відомою схемою, яка складається з трифазного узгоджувального трансформатора, випростовувача і фільтра низької частоти. Коефіцієнт трансформації узгоджувального трансформатора цього давача напруги 12 вибирається з умови, щоб його вихідна напруга при максимально-допустимій напрузі АМ ( $U_{AM}$ ) 3х380+5% не перевищувала максимально-допустимого значення вхідного сигналу регулятора напруги 10 ( $\approx 10В$ ). Стала часу фільтра низької частоти давача напруги 12 узгоджується з частотою зрізу цього контуру регулювання напруги.

Статична і динамічна точність стабілізації напруги ГДЕ залежить від типу регулятора напруги 10 і від параметрів його налагодження. Застосування регулятора напруги інтегрального типу забезпечує нульову статичну похибку регулювання напруги, а вибором його параметрів забезпечують динамічну похибку регулювання напруги, яка не перевищує допустиму, наприклад, 10%.

В режимі неробочого ходу величина напруги на виході задавача напруги 11 ГДЕ ( $U_{3H}$ ) в усталеному режимі дорівнює за значенням і протилежна за полярністю напрузі на виході давача напруги 12 ( $U_{дн}$ ), а сигнал на виході регулятора напруги 10 ( $U_{рн}$ ) дорівнює нулю. Якщо під дією будь-якого збурення, наприклад, при зростанні навантаження, чи зменшенні швидкості АМ,  $U_{AM}$  починає зменшуватися, то на виході регулятора напруги 10 формується керуючий сигнал, який через блок обмеження 9 подається на вхід регулятора струму 6. Полярність цього сигналу є протилежною до сигналу завдання на початковий струм КВКП, що призводить до зменшення струму його навантаження і, як наслідок, до відновлення напруги ГДЕ до заданого рівня, що задається вихідним сигналом задавача напруги генераторного джерела електроенергії 11. Причому, якщо в перехідному режимі сигнал на виході регулятора напруги 10 перевищує значення  $U_{БД}$  яке обмежує блок обмеження 9, то на виході регулятора струму 6 діє різниця сигналів  $U_{3ПД}-U_{БД}$ , що є завданням на мінімально-допустимий струм навантаження КВКП, при якому на виході генераторного джерела електроенергії встановлюється максимально-допустима напруга 3х380+5%.

Якщо під дією будь-якого збурення зростає струм навантаження КВКП, то контур регулювання струму обмежить його на рівні, який визначається завданням на максимальний допустимий струм навантаження КВКП  $U_{зпс} + U_{Б0}$ . При цьому зменшується імовірність аварійного відмикання КВКП, що підвищує надійність роботи генераторного джерела електроенергії і надійність електропостачання.

На фіг 2-13 подано результати експериментальних досліджень запропонованого генераторного джерела електроенергії, що отримані на фізичній моделі. Фізична модель генераторного джерела електроенергії виконана на базі серійної асинхронної машини типу АО51-4 ( $P_H = 4,5 \text{ кВт}$ ,  $U_H = 220/380 \text{ В}$ ,  $I_H = 16,3/9,4 \text{ А}$ ,  $\cos \varphi = 0,83$ ,  $\eta = 85,5\%$ ,  $n_H = 1440 \text{ об/хв}$ ).

Як привод (рушій) асинхронної машини генераторного джерела електроенергії використано електропривод за системою "тиристорний перетворювач - двигун постійного струму" потужністю 5 кВт, який дає змогу

- підтримувати швидкість обертання вала АМ з заданою точністю при зміні навантаження,
- регулювати швидкість в необхідних межах ( $\pm 5\%$ ).

- імпульсувати випадкові збурення швидкості АМ

Для забезпечення високої точності регулювання струму КВКП і напруги генераторного джерела електроенергії застосовано пропорційно-інтегральні регулятори струму КВКП і вихідної напруги ГДЕ.

Дослідження динамічної і статичної точності регулювання напруги запропонованого генераторного джерела електроенергії проводилися в режимах

- стрибкоподібного зменшення (фіг 2-4) і збільшення (фіг 5-7) сигналу завдання на величину напруги генераторного джерела електроенергії ( $U_{ЗН}$ )
- стрибкоподібного вмикання трифазного RL навантаження на виході генераторного джерела електроенергії (фіг 8-10) і його відмикання (фіг 11-13)

Величина RL навантаження і його  $\cos \varphi$  узгоджені з величиною ємності КВКП, як джерела реактивної енергії.

Опрацювання отриманих осцилограм показало наступні значення показників якості регулювання режимних координат генераторного джерела електроенергії

- статичної похибки регулювання напруги

$$\varepsilon_u = \frac{U_{Hx} - U_{Hав}}{U_{Hx}} \cdot 100\% \approx 0\%$$

де  $U_{Hx}$  і  $U_{Hав}$  - усереднені значення напруги однієї фази генераторного джерела електроенергії в режимі неробочого ходу і під навантаженням, відповідно,

- динамічної похибки регулювання напруги

$$\delta_u = \frac{U_{max} - U_{Hx}}{U_{Hx}} \cdot 100\% \approx 7\%$$

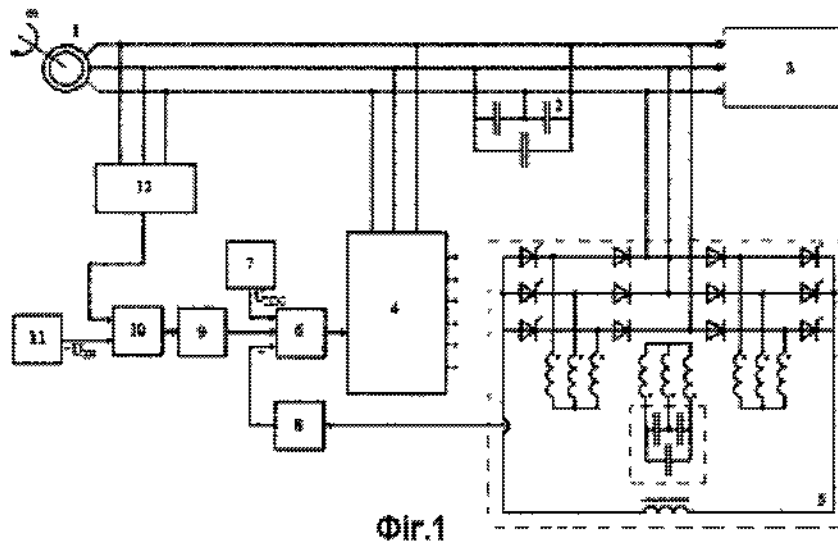
де  $U_{max}$  - максимальне усереднене значення напруги однієї фази генераторного джерела електроенергії,

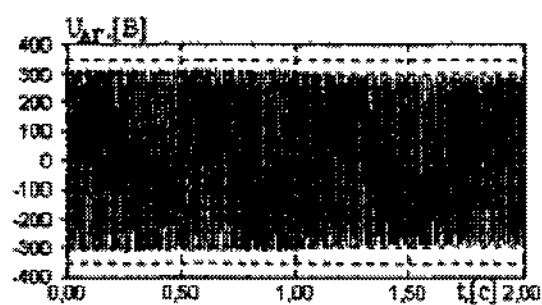
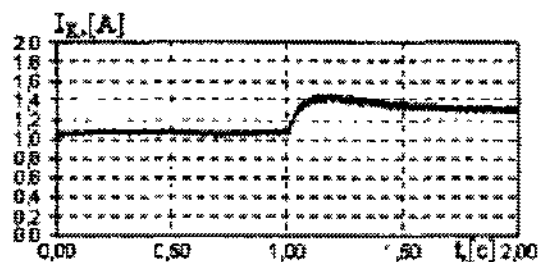
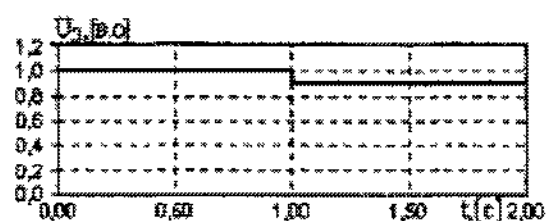
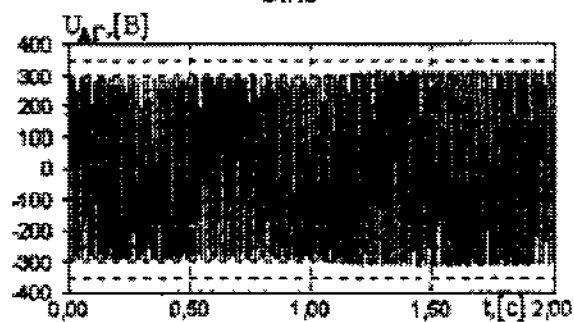
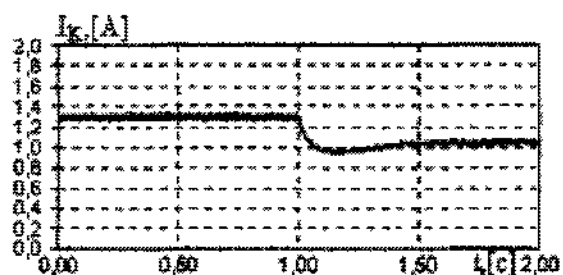
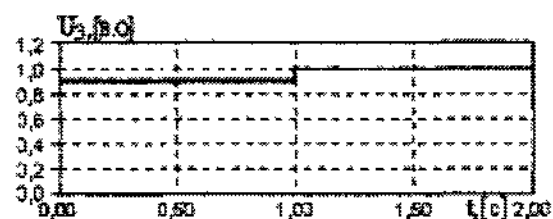
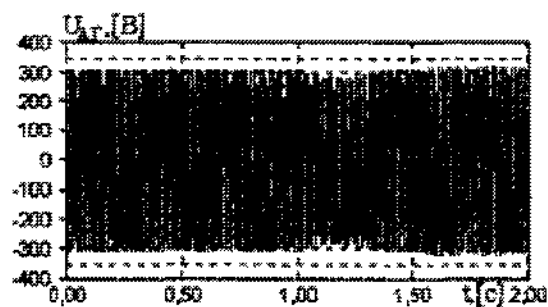
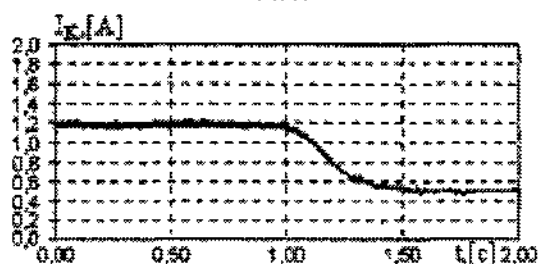
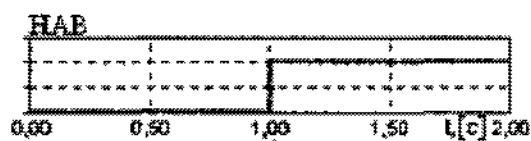
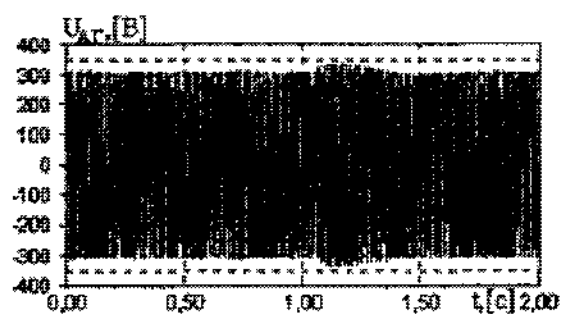
- максимальної динамічної похибки регулювання струму компенсатора

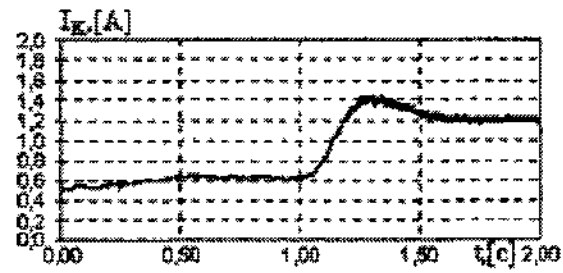
$$\delta_i = \frac{I_{max} - I_y}{I_y} \cdot 100\% \approx 10\%$$

де  $I_{max}$ ,  $I_y$  - максимальне усереднене і поточне усереднене значення струму навантаження КВКП відповідно

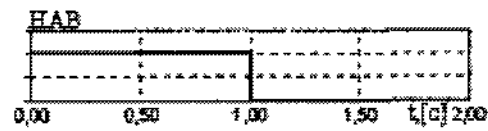
Аналіз отриманих осцилограм показує, що при функціонуванні запропонованого генераторного джерела електроенергії забезпечується нульова статична похибка регулювання напруги автономного джерела для різних навантажень, тобто система автоматичного керування напруги генераторного джерела електроенергії є астатичною до величини його навантаження, забезпечує бажану динамічну точність процесу регулювання напруги і обмеження струму керованого вентильного компенсаційного перетворювача.



 $\Phi_{ir.2}$  $\Phi_{ir.3}$  $\Phi_{ir.4}$  $\Phi_{ir.5}$  $\Phi_{ir.6}$  $\Phi_{ir.7}$  $\Phi_{ir.8}$  $\Phi_{ir.9}$  $\Phi_{ir.10}$  $\Phi_{ir.11}$



Фиг.12



Фиг.13