

УДК 621.313.33

## ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

**Макаревич С.С., к.т.н.**

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*  
Телефон: 044-527-87-29

**Анотація** – розглянуто основні теоретичні положення та фізичні процеси однофазної компенсованої асинхронної машини в режимі генератора.

**Ключові слова:** однофазний конденсаторний двигун, принцип оберненості, автономний однофазний компенсований генератор, внутрішня ємнісна компенсація.

*Постановка проблеми.* Реалізація ідеї у застосуванні в автономній системі електроживлення однофазного асинхронного генератора викликала необхідність аналізу процесу сумісної роботи з асинхронним короткозамкненим двигуном. Процес запуску та роботи асинхронного генератора на асинхронний двигун ускладнюється загальним недоліком цих машин [1], необхідністю джерела реактивної потужності для їх збудження та специфічними умовами забезпечення стійкої сумісної роботи.

*Аналіз останніх досліджень.* Відомо [1], що однофазний конденсаторний асинхронний двигун, у якому просторово зміщені у пазах осердя статора дві робочі обмотки під кутом  $90^\circ$  між ними і включені в однофазну електричну живлячу мережу змінного струму по схемі поворотного автотрансформатора (АТ) на електричну ємність, при визначеній величині якої струми обмоток зсунуті між собою по фазі і в часі на  $90^\circ$ , створюючи магнітне поле, обертаються зі швидкістю

$$\omega = \frac{2\pi f}{p}.$$

Така система електричних струмів є двофазною. Завдяки просторовому зміщенню на  $90^\circ$  двох обмоток статора і включенні їх по схемі поворотного АТ на електричну ємність, як фазозсунутий елемент, відбувається перетворення однофазного кола у двофазну систему, або у загальному вигляді подвоєнням числа фаз. Обертове магнітне поле, перетинаючи обмотку ротора (найчастіше прийнятий найбільш прос-

тий короткозамкнений ротор), індукує у ній ЕРС і струм, взаємодія якого з полем статора створює обертовий момент. Машина працює у режимі асинхронного електродвигуна зі швидкістю  $\omega < \omega_0$ , при ковзанні  $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$  у межах  $0 \leq S \leq 1$ . При цьому одна з обмоток статора

включена на напругу  $\dot{U}$  живлячої мережі і являється основною, головною і первинною обмоткою АТ, послідовно з'єднаною з електричною ємністю  $C_\Delta$ , просторово зміщеною відносно головної обмотки на  $90^\circ$ , у режимі двигуна проти напрямку обертання магнітного поля (рис.1).

включена на напругу  $\dot{U}$  живлячої мережі і являється основною, головною і первинною обмоткою АТ, послідовно з'єднаною з електричною ємністю  $C_\Delta$ , просторово зміщеною відносно головної обмотки на  $90^\circ$ , у режимі двигуна проти напрямку обертання магнітного поля (рис.1).

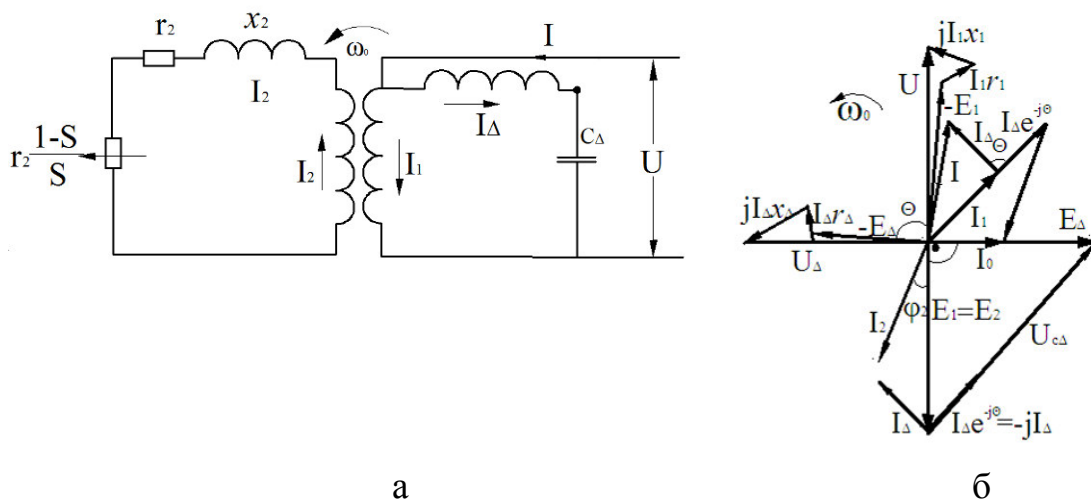


Рис. 1. Принципова електрична схема однофазного асинхронного двигуна (а) і векторна діаграма (б).

У відповідності з принципом оберненості будь яка електрична машина, у тому числі і однофазна асинхронна, може працювати у режимі двигуна і генератора. Проте однофазна конденсаторна машина з просторовим зміщенням на  $90^\circ$  одна відносно одної обмотки статора, відома як електродвигун, у якому вторинна обмотка АТ, з ємністю у колі, зсунута відносно первинної проти напрямку руху машини і її обертового магнітного поля і у режимі двигуна.

Обертове магнітне поле статора (рис.1) індукує в обмотках ЕРС, причому ЕРС  $\dot{E}_\Delta$  вторинної обмотки АТ випереджає ЕРС  $\dot{E}_1$  основної обмотки на кут  $\Theta = 90^\circ$ , тому  $\dot{E}_\Delta = \dot{E}_1 e^{j\Theta} = j\dot{E}_1$ . Напруга на виході АТ без урахування спаду напруги в обмотках дорівнює:

$$\dot{U}_{c\Delta} = \dot{U} - \dot{U}_\Delta, \tag{1}$$

де  $\dot{U} = -\dot{E}_1 + \dot{I}z_1 \approx -\dot{E}_1$  – напруга живлячої мережі,

$\dot{U}_\Delta = -\dot{E}_\Delta + \dot{I}_\Delta z_\Delta \approx -\dot{E}_\Delta$  – напруга вторинної обмотки,

$z_1 = z_\Delta = r_\Delta + jx_\Delta$  – власні опори обмоток статора – основної  $W_1$  та додаткової  $W_\Delta$ , при числах витків  $W_1 = W_\Delta$ . Струм ємності  $C_\Delta$  у колі вторинної обмотки АТ дорівнює:

$$\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{-jx_{c\Delta}}, \quad (2)$$

де  $x_{c\Delta} = \frac{1}{\omega C}$  – величина опору ємності  $C_\Delta$ .

$\omega = 2\pi f$  – швидкість обертання,

$f$  – частота живлячої мережі напругою  $U$ .

Намагнічуючий струм машини визначається як

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2, \quad (3)$$

де  $\dot{I}_1$  – струм основної обмотки,

$\dot{I}_\Delta e^{-j\theta} = -j\dot{I}_\Delta$  – струм додаткової обмотки, просторово приведеної до струму основної обмотки,

$\dot{I}_2$  – робочий струм ротора при прийнятому навантаженні двигуна з ковзанням  $0 \leq S \leq 1$ ,

$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$  – загальний струм двигуна.

У режимі двигуна з приведенням його вторинної обмотки до нерухомої основної обмотки статора ЕРС  $\dot{E}_1$  основної обмотки статора і  $\dot{E}_2$  обмотки ротора визначається як

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = -jx_m \dot{I}_0, \quad (4)$$

де  $x_m$  – реактивний опір намагнічуючого контуру двигуна.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Особливістю переводу однофазної конденсаторної асинхронної машини з режиму двигуна в режим генератора є створення приводним двигуном швидкості обертання  $\omega$  вала ротора машини більше швидкості  $\omega_0$  обертання магнітного поля,  $\omega > \omega_0$  (при незмінному напрямку обертання ротора у режимі двигуна) при одночасній зміні на протилежне просторове положення додаткової (вторинної) обмотки АТ, зсувом відносно основної обмотки на  $90^\circ$  у напрямку обертання машини. Вище зазначене переключення потребує попереднього відключення машини від живлячої мережі, що виключає на практиці переведення однофазної конденсаторної машини в генераторний режим без відключення від мережі живлення [2]. Проте в автономному режимі, при попередньому налаштуванні просторового положення обмоток статора і включенні по схемі поворотного АТ на електричну ємність  $C_\Delta$ , з обертанням від приводного двигуна, робота однофазної конденсаторної машини в генераторному режимі не викликає ускладнень.

*Основні матеріали дослідження (основна частина).* Аналогами схем автономних однофазних конденсаторних асинхронних генераторів (рис.2 і 3) є відповідно [3] та [4]. Відмінними особливостями запропонованого варіанту по рис. 2 та рис.3 відносно представлених аналогів є: 1) різні числа фаз в устаткуванні і призначенні схем (в однофазній конденсаторній машині для створення обертового магнітного поля при подвоєнні числа фаз; пускового обертового моменту, при фазозсунутому варіанті у вигляді електричної ємності), 2) у трифазних аналогах просторове зміщення між собою обмоток статора і включення їх по схемі поворотного АТ на електричну ємність створює ефект внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності з активним впливом на зміни властивостей компенсованих асинхронних машин з підвищенням енергетичної ефективності, 3) величина кута просторового зсуву обмоток статора однієї відносно другої по схемах аналога ( $\Theta = 30^\circ$  при  $m = 3$ ) і запропонованого устаткування ( $\Theta = 90^\circ$  при  $m = 1$ ) відрізняється і залежить від числа фаз,  $\Theta = \frac{\pi}{2m} = \frac{90^\circ}{m}$  при різному вихідному числі фаз устаткування  $m = 3$  у трифазних аналогах і  $m = 1$  у запропонованому варіанті подвоєння ( $m' = 2m$ ) і фазних зон обмоток ( $m'' = 2m'$ ) призводить відповідно до чисел фаз і фазних зон  $m' = 6$ ,  $m' = 12$  та  $m' = 2$ ,  $m'' = 4$ .

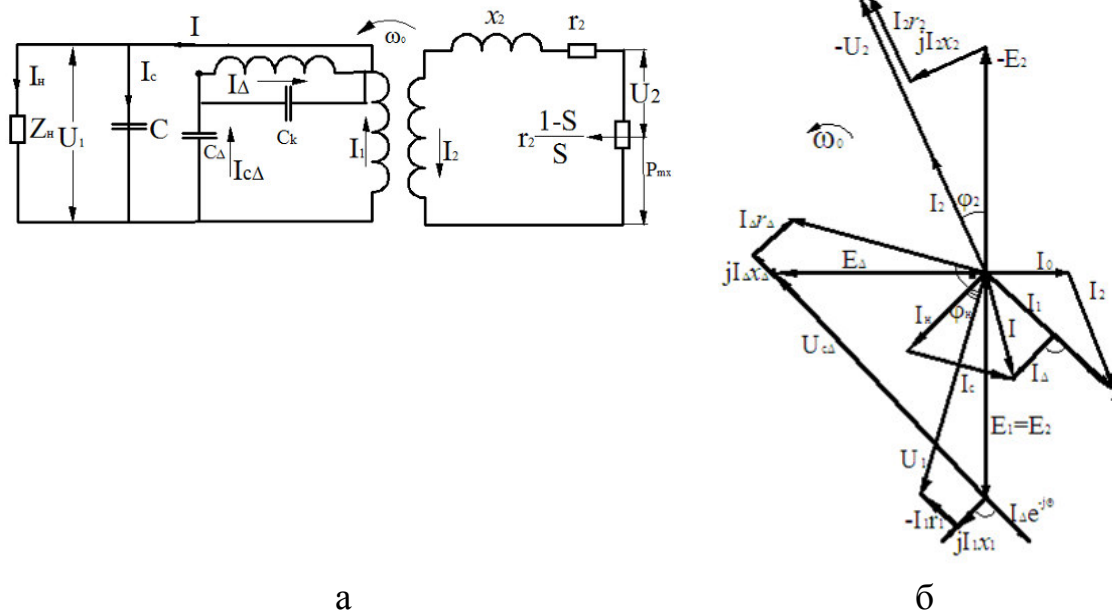


Рис. 2. Принципова схема (а) і векторна діаграма (б) автономного однофазного конденсаторного асинхронного генератора при роботі на статичне навантаження з опором  $Z_n$ .

Призначення електричних ємностей у генераторному режимі запропонованого варіанту і трифазних аналогів практично однакова, за винятком подвоєння числа фаз. Ємності забезпечують живлення асин-

хронних машин реактивною потужністю для збудження їх магнітного поля.

Аналогічно принципівим електричним схемам фази і більшості однакових функціональних властивостей трифазних компенсованих асинхронних машин є однофазні конденсаторні асинхронні машини (ОКАМ), а саме, однофазний компенсований автономний асинхронний генератор (ОКААГ). По схемі рис. 2а ОКААГ працює на статичне індуктивно-активне навантаження з опором  $Z_n = R_n + jX_n$ . Генератор, обертається на валу ротора від приводного двигуна, що має ємнісне самозбудження (при наявності залишкового магнетизму у сталі ротора) і зовнішньої електричної ємності  $C$ , реактивна потужність йде на збудження генератора, тобто на створення основного магнітного поля і поля розсіювання) та компенсацію реактивної потужності індуктивного характеру навантаження. Додаткова ємність  $C_\Delta$  у колі вторинної обмотки АТ відіграє роль фазозсунутого устаткування при подвоєнні числа фаз для створення обертового поля і додаткового ємнісного збудження. По векторній діаграмі рис. 2б ємнісний струм  $\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{-jx_{c\Delta}}$

на виході АТ по відношенню до загальної напруги генератора  $\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_{z1}$  є ємнісно-активним. Тобто вторинна обмотка  $W_\Delta$  поворотного АТ є суміщеною – робочою по активному навантаженню машини і компенсованою по її ємнісній частині. Основна обмотка  $W_1$ , як і в звичайному асинхронному генераторі є індуктивно-активною за потужністю.

Зі зростанням навантаження генератора активний струм додаткової обмотки дещо збільшує ємнісно-активний струм  $\dot{I}_\Delta$ , напругу на виході АТ  $\dot{U}_\Delta = -jx_{c\Delta} \cdot \dot{I}_\Delta \approx \dot{E}_\Delta - \dot{E}_1$  та виробіток реактивної потужності  $Q_{c\Delta} = I_\Delta^2 x_{c\Delta}$  ємністю  $C_\Delta$ . При цьому збільшення індуктивно-активного навантаження потребує компенсації індуктивної частини та виробітку ємнісної потужності від загальної ємності  $C$ . За рахунок цього знижується частина реактивної потужності для збудження генератора. Частково відбувається розмагнічування генератора, зменшується ЕРС і вихідна напруга  $U_1$ , що призводить до зниження виробітку реактивної потужності ємністю  $C$ . Навіть при незначному збільшенні виробітку реактивної потужності ємністю  $C_\Delta$  загальний виробіток її знижується, що призводить до значного зменшення вихідної напруги генератора  $U_1$  і частоти  $f$  з ростом навантаження. При збільшенні навантаження ( $\cos \varphi_n \approx 0,8$ ) від холостого ходу до номінального, номінальна напруга знижується на 15-20%, що є неприпустимим для електроустановок. Особливо складно протікають динамічні про-

цеси в автономному асинхронному генераторі. Наприклад, при пуску асинхронного двигуна сумірної потужності необхідно збільшити ємність у 4-5 разів у порівнянні з номінальним режимом. Для усунення вище наведеного недоліку застосовують ступінчасте (плавне) регулювання загальної ємності  $C$ , підмагнічування спинки осердя статора генератора постійним струмом і т.д. Але такі способи ускладнюють і здорожують установку. Окрім того, при загальній ємності  $C$  для збудження генератора і компенсації реактивної потужності навантаження у послідовному колі фази автономної установки можуть виникати ферорезонансні явища з неоднозначними накладами струмів і напруг, розмагнічуванням і перемагнічуванням магнітопроводів електричних машин, з неможливістю сумісної роботи.

У запропонованому устаткуванні автономного генератора (рис. 3) з метою стабілізації вихідної напруги і частоти при зростанні навантаження, виключені ферорезонансні явища у послідовному колі ємності  $C$  і нелінійних реактивних опорів асинхронного генератора, приймається поділ ємнісного збудження генератора і споживача.

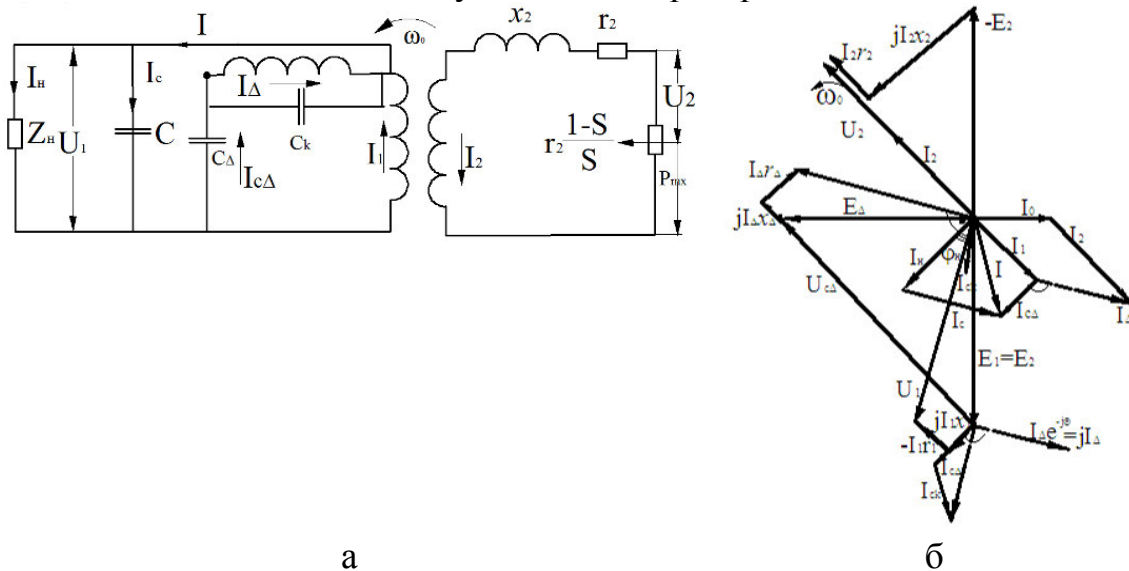


Рис. 3. Принципова схема (а) і векторна діаграма (б) автономного однофазного конденсаторного асинхронного генератора з подвійним ємнісним збудженням.

Зокрема, зовнішня ємність  $C$  на виході генератора призначена для компенсації реактивної потужності споживача, збудження для генератора здійснює внутрішнє ємнісне збудження за допомогою двох ємностей:  $C_{\Delta}$  – включається на виході поворотного АТ схеми його обмотки статора, просторово зміщеного між собою на кут  $\Theta = 90^\circ$ , а  $C_k$  – шунтує вторинну обмотку АТ.

Зі збільшенням навантаження однофазного компенсованого автономного асинхронного генератора (ОКААГ) (рис.3а) зростає активний

струм, що призводить до збільшення величин струмів  $\dot{I}_1$  та  $\dot{I}_\Delta$  робочих обмоток. При цьому зростання ємнісно-активного струму  $\dot{I}_\Delta$  вторинного кола АТ призводить до збільшення напруги  $\dot{U}_{c\Delta}$  на вихідній ємності  $C_\Delta$  та  $\dot{U}_\Delta$  на додатковій внутрішній обмотці АТ. Незначне зростання напруги  $\dot{U}_{c\Delta} = jx_{c\Delta}\dot{I}_\Delta$  на малому по величині ємнісному опорі  $x_{c\Delta}$ , послідовному з додатковою обмоткою  $W_\Delta$ , призводить до невеликого збільшення ємнісної потужності  $Q_{c\Delta} = jx_{c\Delta}\dot{I}_\Delta^2$ , що в свою чергу дещо підмагнічує генератор, але недостатньо для збереження рівня напруги (зовнішні характеристики  $C$ ,  $C_\Delta$  (рис.4)).

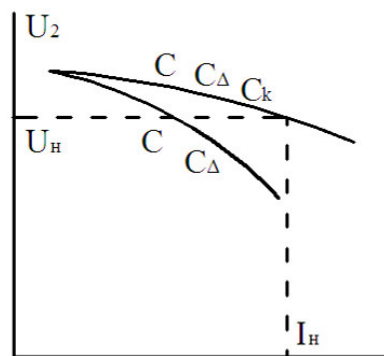


Рис. 4. Зовнішні характеристики однофазних компенсованих автономних асинхронних генераторів.

Додаткова ємність  $C_k$  (рис. 3а) шунтує додаткову обмотку  $W_\Delta$  вторинного кола АТ. При роботі навантаження генератора, відбувається збільшення ємнісно-активного струму  $\dot{I}_\Delta$ , у колі вторинної обмотки  $W_\Delta$  зростає напруга  $\dot{U}_\Delta$ , ємнісний струм  $\dot{I}_{ck} = \frac{\dot{U}_\Delta}{-jx_{ck}}$ . Відбувається виробіток реактивної потужності  $Q_{ck} = jx_{ck}\dot{I}_\Delta^2$ . На відміну від малої величини реактивної потужності послідовної у схемі вторинної обмотки АТ ємності  $C_\Delta$ , струм  $\dot{I}_{ck}$ , що паралельний ємності  $C_k$ , може забезпечити виробіток реактивної потужності  $Q_{ck}$ , достатньої для компенсації розмагнічуючої дії навантаження у процесі зростання. Зовнішня характеристика генератора жорстка (рис.4) зі спадом напруги на 5% при збільшенні навантаження від холостого ходу до номінального.

Векторна діаграма (рис. 3б) ілюструє дію фізичних процесів в ОКААГ. При цьому, на відміну від діаграми (рис. 2б) у генераторі з подвійним внутрішнім ємнісним збудженням ( $C_\Delta$ ,  $C_k$ ) струм ємності

$C_k$ , перетинаючи обмотку  $W_\Delta$ , збільшує струм  $\dot{I}_\Delta = \dot{I}_{c\Delta} + \dot{I}_{ck}$ , де струм ємності  $C_\Delta$  дорівнює  $\dot{I}_\Delta = \frac{\dot{U}_{c\Delta}}{-jx_{c\Delta}}$ . Намагнічуючий струм генератора визначається як

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\Theta} + \dot{I}_2 = \dot{I}_1 - j\dot{I}_\Delta + \dot{I}_2, \quad (5)$$

де  $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{c\Delta} = \dot{I}_n + \dot{I}_c$  – загальний струм генератора,

$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta$  – сума струмів паралельних віток обмоток,

$\dot{I}_n + \dot{I}_c$  – сума струмів навантаження і загальної ємності  $C$ .

*Висновки.* При визначенні величин ємностей  $C_\Delta$ ,  $C_k$ , генератор отримує повне внутрішнє ємнісне збудження, а вплив зовнішньої ємності  $C$  обмежується лише тільки компенсацією реактивної потужності навантаження.

Навантаження з шунтуючою ємністю  $C$  відносно генератора складають загальний навантажувальний активний опір, що виключає ферорезонансні явища в автономній системі електроживлення з компенсованим асинхронним генератором.

Однофазний автономний асинхронний генератор з короткозамкненим ротором та однофазною обмоткою статора з подвійним внутрішнім ємнісним збудженням може застосовуватися у якості джерела живлення однофазним змінним струмом для ручного інструменту, наприклад, електрозварювального апарату та інших однофазних електроустановок.

*Список використаних джерел.*

1. Вольдек А. И. Электрические машин. / А. И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832с.
2. Компенсовані асинхронні машини: монографія / В. І. Мішин, В. В. Каплун, Р. М. Чуєнко, С. С. Макаревич, В. В. Гаврилюк] – К. : КНУТД, 2012. – 220с.
3. Пат. 83730 Україна, МПК H02K 17/00. Автономний асинхронний генератор / Мішин В. І., Каплун В. В., Козирський В. В., Кулинич А. М., Макаревич С. С. ; заявник і власник Національний аграрний університет. – № а200610561 ; заявл. 05.10.06 ; опубл. 11.08.08, Бюл. № 15.
4. Пат. 89884 Україна, МПК H02K 17/00 H02K 17/42. Автономний асинхронний генератор / Мішин В. І., Каплун В. В., Козирський В. В., Макаревич С. С. ; заявник і власник Національний аграрний університет. – № а200809091; заявл. 11.07.08 ; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5.)



## **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО АВТОНОМНОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА**

Макаревич С.С.

***Аннотация*** – в статье изложены основные теоретические подходы и физические процессы однофазного компенсированного автономного асинхронного генератора.

## **THE RESEARCH OPERATING MODES OF SINGLE-PHASE AUTONOMOUS ASYNCHRONOUS GENERATOR**

S. Makarevich

### ***Summary***

**The main theoretical position and physical processes compensated single-phase asynchronous machine in generator mode were conceived.**