

УДК:621.313.322

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОЇ СУМІСНОЇ РОБОТИ РІЗНОРІДНИХ  
АСИНХРОННИХ МАШИН В АВТОНОМНОМУ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ**

**В.І. Мішин**, доктор технічних наук, професор,

**С.С. Макаревич**, кандидат технічних наук, доцент

**Р.М. Чуєнко**, кандидат технічних наук, доцент

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [roman\\_chuenko@ukr.net](mailto:roman_chuenko@ukr.net)*

**Анотація.** Автономний електромеханічний комплекс є частковим варіантом автономної електроенергетичної системи з електричними машинами у якості джерела і споживача електроенергії.

Реалізація ідеї заміни складного синхронного генератора на більш простий надійний та відносно дешевий автономний асинхронний генератор із короткозамкненим ротором унеможливорюється низкою труднощів, зумовлених загальними недоліками асинхронних машин.

На прикладі розрахунку і аналізу характеристик фізичної моделі автономного електромеханічного комплексу показані можливості та умови сумісної роботи асинхронного генератора і двигуна співставної потужності за різних варіантів ємнісного збудження генератора

Для забезпечення умов стійкої усталеної роботи різнорідних асинхронного генератора і двигуна співставної потужності в автономному електромеханічному комплексі запропоновано розподілення ємностей збудження машин по окремих вітках електричного кола, не пов'язаних між собою умовами ферорезонансу напруг.

На відміну від інших автономних комплексів із асинхронними машинами лише комплекс з узагальненим компенсованим автономним асинхронним генератором з асинхронним двигуном виявляється працездатним у режимах пуску та розгону асинхронного двигуна співставної із генератором потужності. Такий пуск здійснюється при 3-4 кратному збільшенні сумарної ємності збудження порівняно із її величиною для нормального режиму роботи.

**Ключові слова:** автономний електромеханічний комплекс, асинхронний генератор, асинхронний двигун, ємнісне збудження, ферорезонанс напруг, опір намагнічуючого контуру.

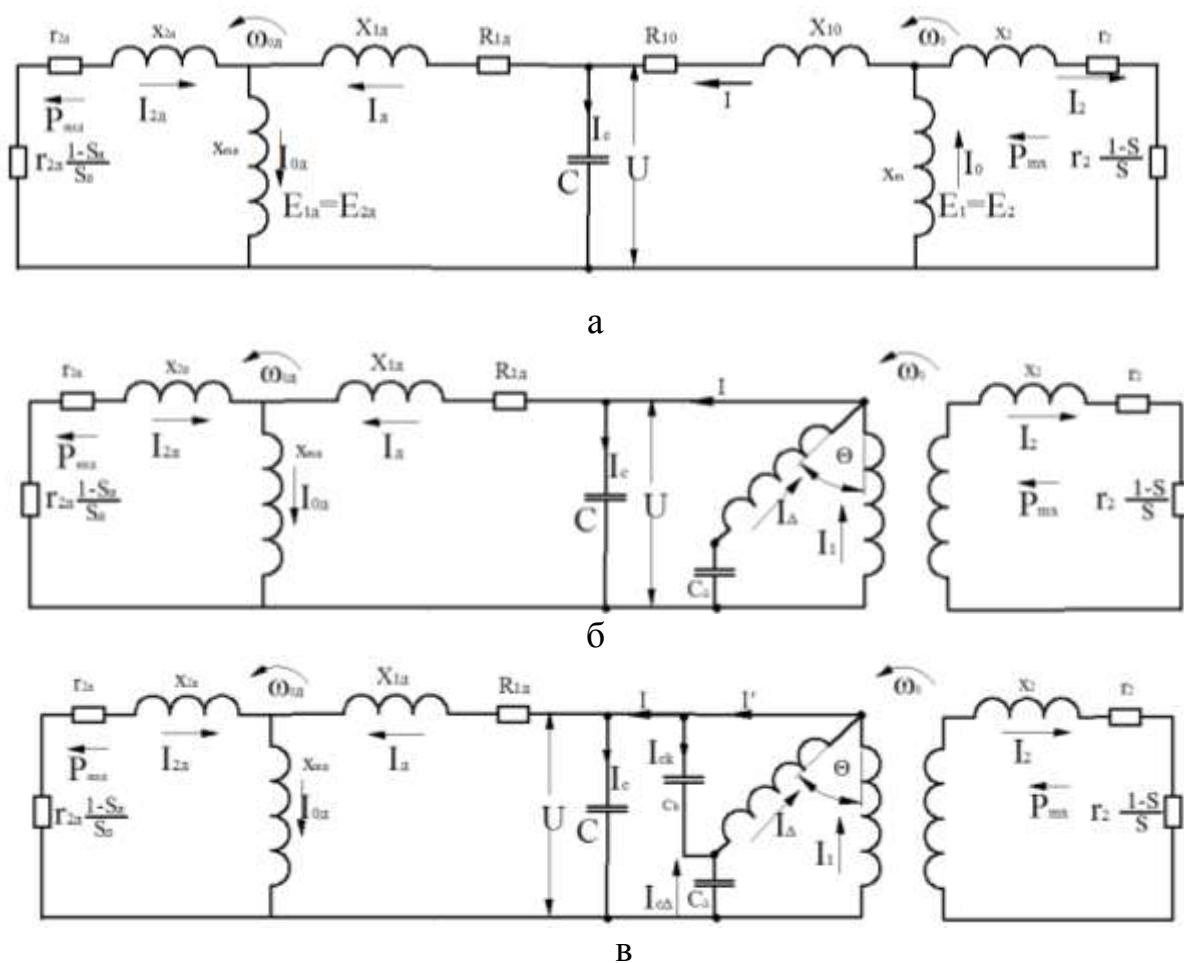
**Актуальність.** Автономний електромеханічний комплекс (АЕК) є частковим варіантом автономної електроенергетичної системи з електричними машинами у якості джерела і споживача електроенергії. Джерелом електричної енергії у такому комплексі є синхронний генератор (СГ), а основним споживачем – асинхронний електродвигун (АД) із короткозамкненим ротором.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Реалізація ідеї заміни складного СГ на більш простий надійний та відносно дешевий автономний асинхронний генератор (ААГ) із короткозамкненим ротором унеможливорюється низкою труднощів, зумовлених загальними недоліками асинхронних машин (АМ) [1], зокрема, необхідністю окремого джерела реактивної потужності в автономній системі з ААГ.

**Мета дослідження.** На прикладі розрахунку і аналізу характеристик фізичної моделі автономного електромеханічного комплексу показані можливості та умови сумісної роботи асинхронного генератора і двигуна співставної потужності за різних варіантів ємнісного збудження генератора (рис.1).

**Матеріали і методи дослідження.** Для об'єктивної порівняльної оцінки результатів розрахунку для всіх варіантів моделі обрано робочий АД 4А71А2 потужністю  $P_n=0,75$  кВт, а єдиною базовою машиною для всіх варіантів АГ є серійна АМ 4А71В2 потужністю  $P_n=1,1$  кВт. Коефіцієнт сумірності базових номінальних потужності АД і ААГ, як і в автономному комплексі з СГ і АД, прийнятий 0,7 [4]. Вибір серії 4А базових машин обґрунтовано доступністю вихідних параметричних даних АМ [5].

**Результати дослідження та їх обговорення.** В основній вихідній схемі автономного електромеханічного комплексу (рис. 1, а) прийняті базові серійні ААГ і АД з єдиним джерелом реактивної потужності для їх одночасного збудження у вигляді батареї електричних конденсаторів ємністю  $C$ , включеної у зовнішнє коло на виході генератора паралельно двигуну. При цьому загальний опір двигуна  $Z_o$  і конденсаторів відносно генератора складає  $z = \frac{-jx_c Z_o}{Z_o - jx_c}$ .



**Рис. 1. Принципові електричні схеми автономного електромеханічного комплексу з асинхронними машинами: а) АД-ААГ; б) АД-КААГ; в) АД-УКААГ**

У зв'язку з малою тривалістю перехідних електромагнітних у порівнянні з електромеханічними процесами розрахунок пускових і робочих характеристик машин АЕК проводився в квазіусталеному процесі. При цьому вихідні розрахункові рівняння електричної рівноваги представляються у вигляді:

$$\begin{aligned} \text{для АД} \quad \dot{U} &= -\dot{E}_{10} + i_{01}Z_{10} = i_0Z_0, \\ 0 &= -\dot{E}_{20} + i_{20}Z_{20}, \end{aligned} \quad (1.a)$$

$$\begin{aligned} \text{для ААГ} \quad \dot{U} &= \dot{E}_1 - i_1Z_{10} = iZ \\ 0 &= \dot{E}_2 - i_2Z_2, \end{aligned} \quad (1.б)$$

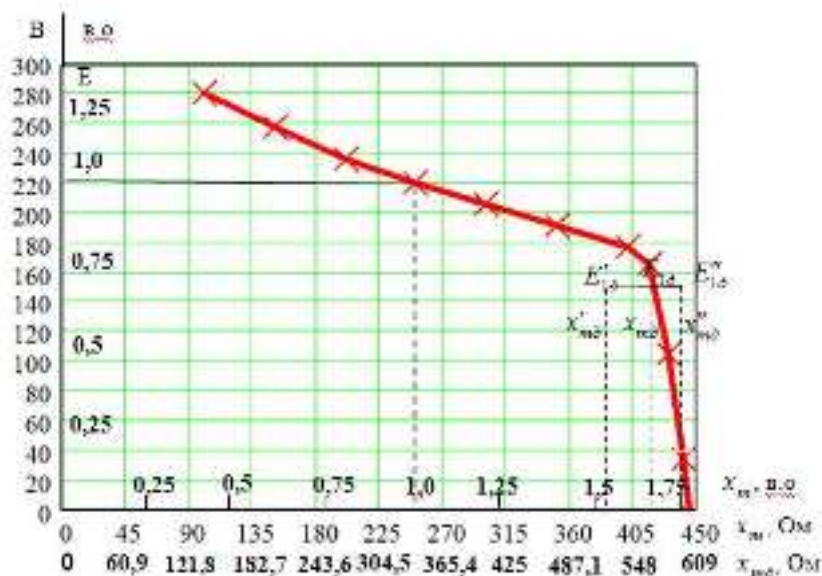
Розрахунок величин ЕРС і струмів двигуна та генератора, їх загальної напруги  $\dot{U}$  ведеться при заданій постійній швидкості  $\omega_0$  вала ротора, зміні

ковзання робочого двигуна у діапазоні  $s_{dp} \leq s_d \leq 1$  при заданій ємності  $C$ , заданих [5] постійних параметрах Т-подібної схеми заміщення АМ (рис. 1, а). Змінні реактивні опори намагнічуючих контурів ( $x_m$  – генератора і  $x_{m\delta}$  – двигуна) задані лише побічно кривою намагнічування асинхронної машини [6] і потребують попереднього визначення.

Для визначення ЕРС  $E_1$  (1.б), струму  $i$ , напруги  $U$  автономного асинхронного генератора необхідно задатися власними параметрами і величиною зовнішнього опору  $Z$ . Це приводить до широкої зміни опору контуру намагнічування АД, який зменшується від максимального пускового  $x_{m\delta 0}$  до робочого  $x_{m\delta}$  ( $x_{m\delta} > x_{m\delta 0}$ ). Пояснюється це тим, що у відповідності з рівнянням електричної рівноваги обмотки статора АД його проти ЕРС  $E_{1\delta}$  урівноважується напругою, тому  $E_{1\delta} < U$  ( під час пуску АД), а за кривою  $E=f(x_{m\delta})$  (рис. 2) визначається збільшення величини опору  $x_{m\delta}$  та зменшення ЕРС двигуна. У свою чергу ЕРС в основному залежить від ковзання  $s_d$  і зменшується з його ростом. За значного пускового струму АД ЕРС  $E_{1\delta}$  стрімко падає, при цьому опір кола намагнічування двигуна становить  $x_{m\delta n} \approx 580$  Ом (рис. 2), зі зменшенням ковзання до критичного  $s_{\delta k}$  (рис. 2) кола намагнічування практично не змінюється і складає  $x_{m\delta} \approx 560$  Ом. При подальшому розгоні АД від  $s_{\delta k}$  до номінального  $s_{\delta n}$  ЕРС збільшується, опір кола намагнічування АД змінюється у межах  $550 \div 450$  Ом. Вцілому під час пуску та розгону АД  $x_{m\delta}$  змінюється у обмеженому діапазоні  $580 \div 450$  Ом, а його ЕРС в АЕК визначається режимом роботи, тобто ковзанням  $s_d$ . З рівняння (1.а) електричної рівноваги при постійному заданому  $s_d$  ЕРС практично не залежить від зміни  $x_{m\delta}$  у обмеженому діапазоні. Разом із тим ЕРС  $E_{1\delta}$  та опір кола намагнічування АД ( $x_{m\delta}$  повинні відповідати одне одному по типовій кривій залежності  $E=f(x_m)$  даної АМ.

У відповідності із розрахунковим методом послідовних наближень вище відмічені властивості АД дозволяють прийняти попередню величину опору кола намагнічування  $x_{m\delta}$  при заданому режимі роботи ( $s_d$ ). У процесі наступних

розрахунків у відповідності з величинами  $E_{10}$  та  $x_{m0}$  кривої залежності  $E=f(x_m)$  уточнюється величина  $x_{m0}$ , що за необхідністю приймається за розрахункову.



**Рис. 2. Графік залежності  $E=f(x_m)$  на основі типової кривої намагнічування асинхронної машини АИР 71В2 –  $x_m$  і АИР 71А2 –  $x_{m0}$ .**

На відміну від АД, де ковзання приймається у діапазоні  $s_{dp} \leq s_d \leq 1$  і задає режим роботи АМ, в автономному асинхронному генераторі  $s < 0$  задається складною залежністю від параметрів – власних (у тому числі і  $x_m$ ) та внесених (наприклад, навантаження –АД і зовнішня ємність  $C$ ). Проте залежність усіх струмів ААГ від єдиної ЕРС  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$ , як основного енергетичного фактора генератора дає чітке фізичне обґрунтування визначенню ковзання  $s$  та опору контуру намагнічування:

$$i = \frac{\dot{E}_1}{Z_{10} + Z} = \frac{\dot{E}}{Z_{1r}}, \quad i_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} \quad \text{з (1.б)}, \quad i_0 = j \frac{\dot{E}_1}{x_m} \quad (2)$$

Так з умови рівноваги МРС, струмів  $\dot{I} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2$  при діленні їх на  $\dot{E}_1 = \dot{E}_2$  з (2) отримують рівняння рівноваги параметрів ААГ:

$$\frac{1}{Z_{1e}} = j \frac{1}{x_m} - \frac{1}{Z_2} \quad (3)$$

де  $Z_{1e} = Z + Z_{10} = R_{1e} + jX_{1e}$  – еквівалентний опір фази комплексу при  $Z_{10} = R_{10} + jX_{10}$  – власному опорі фази обмотки статора ААГ,  $R_{10}$  та  $X_{10}$  – активний та

реактивний опір розсіювання [5];  $R_{1e} = r + R_{10}$ ;  $-jX_{1e} = -jx + jX_{10}$ ;  $r$ ,  $(-jx)$  – складові опору  $Z = r - jx$ ;  $Z_2 = \frac{r_2}{s} + jx_2$  – опір фази кола ротора ААГ.

При підстановці  $Z_{1e} = R_{1e} - jX_{1e}$  та  $Z_2$  у (3), з умови рівноваги дійсної частини отримують:

$$\frac{r_2}{s} = -\frac{|Z_{1e}|^2}{2R_{1e}} \pm \sqrt{\frac{|Z_{1e}|^4}{4R_{1e}^2} - x_2^2} \quad \text{та } s < 0 \quad (4.a)$$

$$x_m = \frac{|Z_{1e}|^2 \cdot |Z_2|^2}{X_{1e} \cdot |Z_2|^2 - x_2 \cdot |Z_{1e}|^2} \quad (4.б)$$

$$\text{при } |Z_{1e}|^2 = R_{1e}^2 + X_{1e}^2; |Z_2|^2 = \left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2.$$

Опір  $x_m$  визначає рівень намагнічування (збудження) ААГ. По величині  $x_m$  з кривої залежності  $E=f(x_m)$  для АМ 4А71В2 (рис. 2) знаходять основну ЕРС генератора, струми з (2)  $i$ ,  $i_2$ ,  $i_0$ , напругу  $\dot{U}$  з (1.б), яка є робочою напругою АД.

За результатами розрахунку для декількох значень  $s_\delta$  у діапазоні  $s_{\delta p} \leq s_\delta \leq 1$  будують зовнішню характеристику ААГ  $U=f(I_\delta)$ , механічну характеристику АД  $M_\delta = f(s_\delta)$ .

У послідовному еквівалентному колі АЕК з нелінійними феромагнітними елементами АМ і ємністю  $C$  виникає явище ферорезонансу напруг з кидками струму та моменту двигуна робочого двигуна. При цьому (4.б) величина знаменника  $X_{1e} \cdot |Z_2|^2 - x_2 \cdot |Z_{1e}|^2 \rightarrow 0$  прямує до нуля і відбувається розрив функції з  $x_m = \pm\infty$ .

Критерієм та умовою стійкої спільної роботи АЕК є опір кола намагнічування генератора  $X_m$ , який плавно змінюється у допустимих межах ЕРС за кривою намагнічування  $E=f(x_m)$ . У випадку ж порушення умов стійкої спільної роботи АМ даний опір  $x_m$  за величиною і знаком виходить за межі типової кривої намагнічування  $E=f(x_m)$ .

Засобом боротьби із негативним явищем ферорезонансу в АЕК може слугувати спосіб розподілу схем ємнісного збудження асинхронного генератора і двигуна по окремим віткам електричного кола комплексу, які не пов'язані між собою умовами резонансу напруг. Зокрема за обмеження ролі зовнішньої ємності  $C$  лише збудженням робочого двигуна їх загальний опір  $Z = r - jx$  буде носити лише активний характер. Але при цьому генератор повинен мати власне незалежне збудження, наприклад, внутрішнє ємнісне збудження.

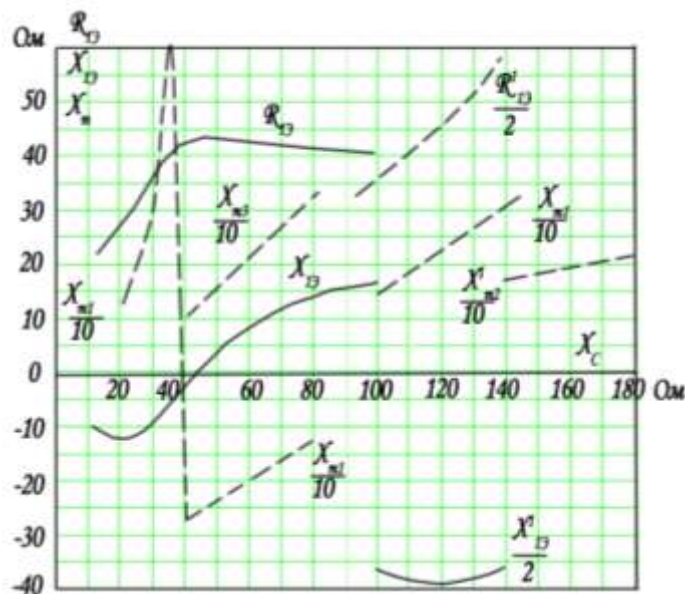
Таким умовам відповідає компенсований автономний асинхронний генератор (КААГ) та повністю відповідає його узагальнена модифікація – УКААГ із внутрішнім ємнісним збудженням [8].

КААГ та АД співставної потужності стійко працюють в усталеному режимі за номінального навантаження. Внутрішня ємність  $C_d$  не забезпечує повного збудження КААГ, а відіграє лише допоміжну роль у підвищенні ступеня жорсткості його зовнішньої характеристики. Основна ж частина збудження КААГ та повне збудження робочого АД забезпечується зовнішньою ємністю  $C$ . При цьому зберігається ємнісний характер реактивної складової повного опору  $Z = r - jx$  двигуна та ємності. Тому під час пуску робочого двигуна за великої ємності  $C$  в автономній системі КААГ-АД, як і для ААГ, зберігається небезпека виникнення ферорезонансу та порушення умов стійкої роботи.

Для усунення даних явищ необхідно під час пуску та розгону робочого двигуна посилити його зовнішнє збудження та внутрішнє збудження КААГ, тобто аналогічно із синхронним генератором (СГ) здійснити форсування збудження. Але внутрішня ємність КААГ  $C_d$  не здатна взяти на себе повне його збудження, тому для посилення збудження генератора його додаткову фазну обмотку шунтують додатковою ємністю  $C_k$ . Дана ємність  $C_k$  також може бути використана для регулювання напруги за нормального збудження та його форсування за накиду навантаження. Паралельна до додаткової обмотки генератора ємність  $C_k$  та послідовна із неї ємність  $C_d$  утворюють змішане

збудження КААГ, а разом із зовнішньою ємністю  $C$  збудження АЕК має загальний характер. Генератор із повним комплексом ємностей збудження  $C, C_{\Delta}, C_k$ , називаємо узагальненим компенсованим автономним асинхронним генератором (УКААГ). Частковий варіант УКААГ при  $X_{ck} = \infty$  являє собою КААГ, а при  $X_{c\Delta} = \infty$  та  $\theta=0$  генератор стає базовим ААГ з двома співвісними паралельними вітками обмотки статора.

На рис. 3 наведені результати розрахунку характеристик під час пуску робочого АД 4А71В2 від УКААГ на базі АМ 4А71В2. Нормальний пуск робочого АД із пусковим моментом  $M_{\text{он}} = 3,045 \text{ Нм} = 1,2M_{\text{он}}$  відбувається при  $X_C = 55 \text{ Ом}$ ,  $X_{c\Delta} = X_{ck} = 70 \text{ Ом}$  за меншого ніж у комплексі ААГ+АД пускового струму (5,5 А для УКААГ та 6,9 А для КААГ), хоча і за більшої витрати реактивної потужності (1000 Вар – УКААГ, 790 Вар – КААГ). Але пуск робочого АД в АЕК із УКААГ на відміну від системи ААГ+АД здійснюється надійно без небезпеки зриву пускової операції.



**Рис.3. Графіки залежностей активної  $R_{1e}$ , реактивної  $X_{1e}$  складових еквівалентного опору фази АЕК та опору  $x_m$  контуру намагнічування генератора від ємнісного опору  $x_c$  на виході генератора**

Таку надійність забезпечують:



- розподіл ємностей збудження для АМ на три частини із розташуванням їх в окремих вітках електричного кола АЕК;
- зменшення ємності у зовнішньому колі генератора та обмеження її ролі лише збудженням двигуна;
- повне самозбудження генератора за рахунок внутрішньої ємнісної компенсації, головним чином за рахунок шунтування додаткової обмотки ємністю, чим забезпечується форсування збудження в АЕК під час пуску АД.

**Висновки і перспективи.** На відміну від інших автономних комплексів із АМ лише комплекс УКААГ+АД виявляється працездатним у режимах пуску та розгону АД співставної із генератором потужності. Такий пуск здійснюється при 3-4 кратному збільшенні сумарної ємності збудження порівняно із її величиною для нормального режиму роботи.

Подальший розвиток АЕК із АМ може отримати шляхом заміни серійних АД на компенсовані асинхронні двигуни (КАД) [7] із підвищеним пусковим моментом, зменшеним робочим струмом та підвищеним коефіцієнтом потужності. За простотою конструкції, ступенем надійності та вартості АЕК із компенсованими АМ може стати гідним конкурентом класичних автономних комплексів СГ+АД.

#### **Список літератури.**

1. Копылов И.П. Электрические машины / Копылов И.П. – М.: Высш. Школа, 2002. – 600 с.
2. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока / Балагуров В.А. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.
3. Бессонов Л.А. Нелинейные электрические цепи / Бессонов Л.А. – М.: Высш. школа, 1977. – 348 с.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей / Сыромятников И.А. – М. –Л.: ГЭИ, 1963. – 528 с.
5. Асинхронные двигатели серии 4А / [Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
6. Мишин В.И. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельском хозяйстве / Мишин В.И., Собор И.В. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 128 с.

7. Мишин В.И. Эффект внутренней емкостной компенсации реактивной мощности в асинхронных двигателях / В.И. Мишин, Р.Н. Чуенко, В.В. Гаврилюк // Электротехника. – 2009. – №8. – С. 30–36.

8. Мишин В.И. Автономный асинхронный генератор с внутренним емкостным возбуждением / В.И. Мишин, В.В. Каплун, С.С. Макаревич // Электротехника. – 2011. – №3. – С. 20–25.

### **References**

1. Коруилов, I. P. (2002) Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Vyssh. Shkola, 600.

2. Balagurov, V. A. (1982) Proektirovanie spetsialnykh elektricheskikh mashin peremennogo toka [Design of special electric alternating current machines]. Vyssh. shkola, 272.

3. Bessonov, L. A. (1977) Nelineynye elektricheskie tsepi [Non-linear electrical circuits]. Vyssh. shkola, 348.

4. Syromyatnikov, I. A. (1963) Rezhimy raboty asinhronnykh i sinhronnykh elektrodvigateley [Modes of operation of asynchronous and synchronous electric motors]. GEI, 528.

5. Kravchik, A. E., Shlaf, M. M., Afonin, V. I., Sobolenskaya, E. A. (1982). Asinhronnyye dvigateli [Induction motors]. Energoizdat, 504.

6. Mishin, V.I., Sobor, I.V. (1991) Modelirovanie avariynnykh rezhimov elektrodvigateley v selskom hozyaystve. [Modes of operation of asynchronous and synchronous electric motors]. Kishinev, 128.

7. Mishin, V. I., Chuenko R. N., Gavrilyuk V. V. (2009). Effekt vnutrenney emkostnoy kompensatsii reaktivnoy moschnosti v asinhronnykh [The effect of internal capacitive compensation of reactive power in induction motors]. Electrical Engineering, 8, 30–36.

8. Mishin, V.I., Kaplun, V.V, Makarevich, S.S (2011). Avtonomnyiy asinhronnyiy generator s vnutrennim emkostnyim vozbuzhdeniem [Autonomous asynchronous generator with internal capacitive excitation]. Electrical Engineering, 3, 20–25.

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТОЙКОЙ СОВМЕСТИМОЙ РАБОТЫ РАЗНОРОДНЫХ АСИНХРОННЫХ МАШИН В АВТОНОМНОМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ**

**В.И. Мишин**, С.С. Макаревич, Р.М. Чуенко

**Анотация.** Автономный электромеханический комплекс является частичным вариантом автономной электроэнергетической системы с электрическими машинами в качестве источника и потребителя электроэнергии.

Реализация идеи замены сложного синхронного генератора на более простой надежный и относительно дешевый автономный асинхронный

*генератор с короткозамкнутым ротором делается невозможным рядом трудностей, predetermined общими недостатками асинхронных машин.*

*На примере расчета и анализа характеристик физической модели автономного электромеханического комплекса показаны возможности и условия совместимой работы асинхронного генератора и двигателя соизмеримой мощности при разных вариантах емкостного возбуждения генератора.*

*Для обеспечения условий устойчивой работы разнородных асинхронного генератора и двигателя соизмеримой мощности в автономном электромеханическом комплексе предложено распределение емкостей возбуждения машин по отдельным веткам электрической цепи, не связанных между собой условиями феррорезонанса напряжений.*

*В отличие от других, автономный комплекс с обобщенным компенсированным асинхронным генератором и с асинхронным двигателем оказывается работоспособным в режимах пуска и разгона асинхронного двигателя соизмеримой с генератором мощности. Такой пуск осуществляется при 3-4 кратном увеличении суммарной емкости возбуждения в сравнении с ее величиной для нормального режима работы.*

**Ключевые слова:** *автономный электромеханический комплекс, асинхронный генератор, асинхронный двигатель, ёмкостное возбуждения, феррорезонанс напряжений, сопротивление намагничивающего контура.*

## **ENSURING STABILITY COMPATIBLE WORK OF THE DIFFERENT ASYNCHRONOUS MACHINES IN THE AUTONOMOUS ELECTROMECHANICAL COMPLEX**

**V. Mishyn**, S. Makarevych, R. Chuenko

**Abstract.** *An autonomous electromechanical complex is a partial version of an autonomous electric power system with electric machines as a source and consumer of electricity.*

*Realization of idea of replacement of difficult synchronous generator on more simple reliable and relatively a cheap autonomous asynchronous generator with the short-circuit rotor is done by impossible by the row of the difficulties predefined by the general lacks of asynchronous machines, in particular, by the necessity of separate source of reactive-power for the off-line system with an autonomous asynchronous generator.*

*On the example of calculation and analysis of descriptions of physical model of autonomous electromechanics complex the shown possibilities and terms of compatible work of asynchronous generator and motor of comperative power are at the different variants of capacity excitation*

*The distribution of capacities in asynchronous generator and motor for individual branches of the electrical circuit, unconnected conditions ferroresonance voltages was*

*proposed to ensure the stable work of the dissimilar conditions in machines of comparable power in the autonomous electromechanical complex.*

*Unlike other autonomous complexes with asynchronous machines only a complex is generalized compensated autonomous asynchronous generator plus an asynchronous motor appears capable of working in the modes of starting and acceleration of asynchronous motor of cooperative with the generator of power. Such starting comes true at the triple increase of total capacity of excitation by comparison to her size for the normal mode.*

***Index terms:*** *autonomous electromechanical complex, asynchronous generator, induction motor, capacitance excitement, ferroresonance voltages.*