УДК:621.313.322

В.І. МІШИН, д-р техн. наук, проф., НУБіП України, Київ
Р.М. ЧУЄНКО, канд. техн. наук, проф., НУБіП України, Київ
С.С. МАКАРЕВИЧ, аспірантка, НУБіП України, Київ

СУМІСНА РОБОТА РІЗНОРІДНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН В АВТОНОМНОМУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

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

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

Вступ. 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) з короткозамкнутим ротором. При 4-5 кратному форсуванні постійного струму збудження СГ забезпечується задовільний пуск та розгін АД номінальною потужністю до 0,7 від номінальної потужності СГ. Проте суміщення в одному автономному електромеханічному комплексі (АЕК) конструктивно складного та дорогого СГ із більш простим і дешевим АД не відповідає вимогам однакового ступеня надійності окремих машин у електромеханічному комплексі.

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

Мета досліджень. На прикладі розрахунку і аналізу характеристик фізичної моделі автономного електромеханічного комплексу розглянемо можливості і умови сумісної роботи асинхронного генератора і двигуна сумірної потужності при різних варіантах ємнісного збудження генератора (рис. 1).

© Мішин В.І., Чуєнко Р.М., Макаревич С.С., 2012

Методика досліджень. Для об'єктивної порівняльної оцінки результатів розрахунку для всіх варіантів моделі обрано робочий АД 4А71А2 потужністю $P_н$=0,75 кВт, а єдиною базовою машиною для всіх варіантів АГ є серійна АМ 4А71В2 потужністю $P_н$=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 обгрунтовано доступністю вихідних параметричних даних АМ [5].

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 $Z_д$ і конденсаторів відносно генератора складає $Z = \dfrac{-jx_c Z_д}{Z_д - jx_c}$.

При повній компенсації реактивної потужності двигуна надлишок реактивної потужності від ємності C передається генератору для його збудження. Тому опір Z зовнішнього кола відносно генератора має активно-ємнісний характер $Z=r-jx$, де знаки складових r та $(-x)$ визначають напрямок передачі відповідних потужностей: активної $rI^2=P_д$ від генератора до двигуна, реактивної $(-jxI^2)=Q_c$ від конденсаторів до генератора. ААГ є елементом двостороннього живлення, отримуючи механічну потужність (для перетворення її в активну електричну) з валу приводного двигуна, а реактивну для створення магнітних полів АМ від батареї електричних конденсаторів.

У зв'язку з малою тривалістю перехідних електромагнітних у порівнянні з електромеханічними процесами, особливо при затяжних пусках і розгоні АД з малим пусковим моментом при понижених напругах розрахунок пускових і робочих характеристик машин АЕК допустимо проводити у квазіусталеному процесі. При цьому вихідні розрахункові рівняння електричної рівноваги представляються у вигляді:

для АД $$\dot{U} = -\dot{E}_{1д} + \dot{I}_{д1} Z_{1д} = \dot{I}_д Z_д, \qquad 0 = -\dot{E}_{2д} + \dot{I}_{2д} Z_{2д}, \qquad (1.а)$$

для ААГ $$\dot{U} = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_{10} = \dot{I} Z, \qquad 0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2, \qquad (1.б)$$

Розрахунок величин ЕРС і струмів двигуна та генератора, їх загальної напруги $\dot{U}$ ведеться при заданій постійній швидкості ω_0 вала ротора, зміні ковзання робочого двигуна у діапазоні $s_{дp} \le s_д \le 1$ 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 $x_{mд}$ – двигуна) задані лише побічно кривою намагнічування асинхронної машини [6] і потребують попереднього визначення.

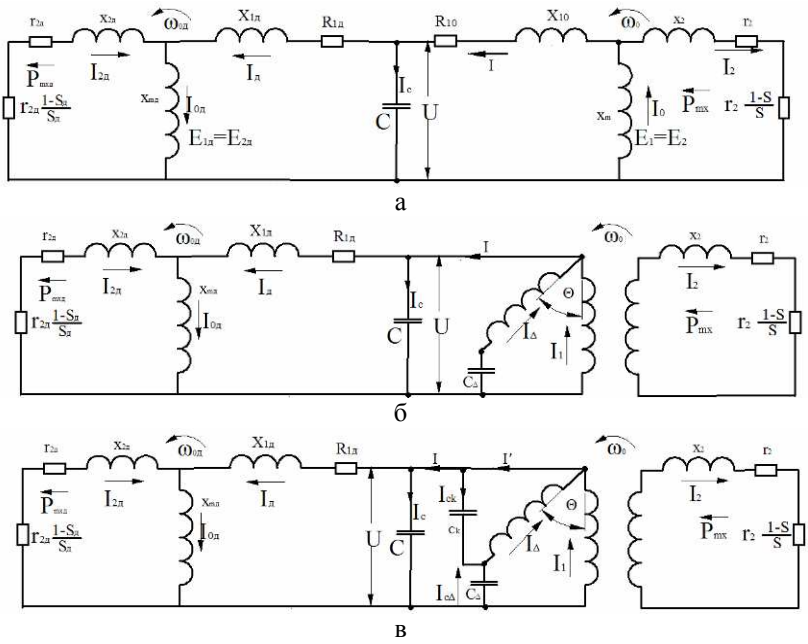

Рис. 1. Принципові електричні схеми автономного електромеханічного комплексу з асинхронними машинами: а – АД-ААГ; б – АД-КААГ; в – АД-УКААГ

Для ряду однотипних АМ певного відрізку потужностей та швидкостей обертання задається типова крива намагнічування як залежність основної ЕРС E машини від струму намагнічування I_μ, $E=f(I_\mu)$ у відносних одиницях (в.о.) при діючих значеннях E та I_μ [3, 6]. У розрахунках вищенаведена залежність апроксимується неперервною функцією, наприклад, многочленом у вигляді $I_\mu = aE + bE^3 + cE^5$, де a, b, c – коефіцієнти апроксимації кривої $E=f(I_\mu)$ [3]. На практиці найкраще використовувати залежність між основною ЕРС і опором x_m контуру намагнічування машини у вигляді квадратичної залежності $\frac{I_\mu}{E} = \frac{1}{x_m} = a + bE^2 + cE^4$, що представлена (рис. 2) як єдина типова крива залежності $E = \varphi(x_m)$ у в.о. для 4А71А2 та 4А71В2.

При переході до абсолютних значень E та x_m в іменованих одиницях (E, В; x_m, Ом) за в.о. для обох машин прийнята ЕРС E_0 ідеального холостого ходу АМ, дорівнює номінальній напрузі, $E_0 = U_н = 220$ В, а відповід-

ний їй опір x_{m0} =249,2 Ом для 4А71В2, $x_{m0\partial}$ = 337,2 Ом для АД 4А71А2 [5].

Для визначення ЕРС $\dot{E}_1$ (1.б), струму $\dot{I}$, напруги $\dot{U}$ 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 $x_{m\partial 0}$ до робочого $x_{m\partial}$ ($x_{m\partial} > x_{m\partial 0}$). Пояснюється це тим, що у відповідності з рівнянням електричної рівноваги обмотки статора АД його протиЕРС $E_{1\partial}$ урівноважується напругою, тому $E_{1\partial} < U$ (під час пуску АД $E_{1\partial n} << U$), а за кривою $E = \varphi(x_{m\partial})$ (рис. 2) визначається збільшення величини опору $x_{m\partial}$ та зменшення ЕРС двигуна. У свою чергу ЕРС в основному залежить від ковзання $\boldsymbol{s}_\partial$ і зменшується з його ростом. За значного пускового струму АД ЕРС $E_{1\partial}$ стрімко падає (01а), опір кола намагнічування двигуна $x_{m\partial\partial} \approx$ 580 Ом (рис. 2), зі зменшенням ковзання до критичного $\boldsymbol{s}_{\partial к}$ (рис. 2) кола намагнічування практично не змінюється і складає $x_{m\partial} \approx$ 560Ом. При подальшому розгоні АД від $\boldsymbol{s}_{\partial к}$ до номінального $\boldsymbol{s}_{\partial н}$ ЕРС збільшується, опір кола намагнічування АД змінюється у межах 550÷450 Ом (при цьому протиЕРС дорівнює 175-200 В). В цілому під час пуску та розгону АД $x_{m\partial}$ змінюється у обмеженому діапазоні 580÷450 Ом, а його ЕРС в АЕК визначається режимом роботи, тобто ковзанням $\boldsymbol{s}_\partial$. З рівняння (1.а) електричної рівноваги при постійному заданому $\boldsymbol{s}_\partial$ ЕРС практично не залежить від зміни $x_{m\partial}$ у обмеженому діапазоні. Разом із тим ЕРС $E_{1\partial}$ та опір кола намагнічування АД $x_{m\partial}$ повинні відповідати одне одному по типовій кривій залежності $E = \varphi(x_{m\partial})$ даної АМ.

У відповідності із розрахунковим методом послідовних наближень вище відмічені властивості АД дозволяють прийняти попередню величину опору кола намагнічування $x_{m\partial}$ при заданому режимі роботи ($\boldsymbol{s}_\partial$). У процесі наступних розрахунків у відповідності з величинами $E_{1\partial}$ та $x_{m\partial}$ кривої залежності $E = \varphi(x_m)$ уточнюється величина $x_{m\partial}$, що за необхідністю приймається за розрахункову.

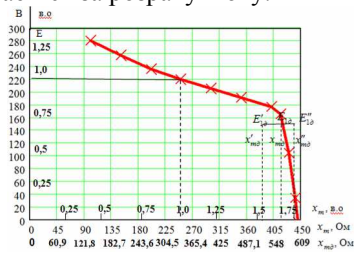

Рис. 2. Графік залежності $E = \varphi(x_m)$ на основі типової кривої намагнічування асинхронної машини АИР 71В2 – x_m і АИР 71А2 – $x_{m\partial}$.

На відміну від АД, де ковзання приймається у діапазоні $\boldsymbol{s}_{\partial p} \le \boldsymbol{s}_{\partial} \le 1$ 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:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}_1}{Z_{10} + Z} = \frac{\dot{E}}{Z_{1t}},\ \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} \text{ з (1.б)}, \qquad \dot{I}_0 = j\frac{\dot{E}_1}{x_m} \tag{2}$$

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:

$$\frac{1}{Z_{1e}} = j\frac{1}{x_m} - \frac{1}{Z_2} \tag{3}$$

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:

$$r_2 \big/ s = -\frac{|Z_{1e}|^2}{2R_{1e}} \pm \sqrt{\frac{|Z_{1e}|^4}{4R_{1e}^2} - x_2^2} \text{ та } s < 0 \tag{4.а}$$

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

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 $E = \varphi(x_m)$ для АМ 4А71В2 (рис. 2) знаходять основну ЕРС генератора, струми з (2) $\dot{I}$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$, напругу $\dot{U}$ з (1.б), яка є робочою напругою АД.

Повернувшись до розрахунку двигуна при прийнятому ковзанні $\boldsymbol{s}_{\partial}$

визначають струм $\dot{I}_{\partial} = \dfrac{\dot{U}}{Z_{\partial}}$, ЕРС $\dot{\mathrm{E}}_{1\partial} = \dot{\mathrm{E}}_{2\partial} = -\dot{U} + \dot{I}_{\partial} Z_{1\partial}$, струм ротора $\dot{I}_{2\partial} = \dfrac{\dot{E}_{2\partial}}{Z_{2\partial}}$ при $Z_{2\partial} = \dfrac{r_{2\partial}}{s_{\partial}} + jx_{2\partial}$ і обертовий електромагнітний момент $M_{\partial} = m\dfrac{I_{2\partial}^2 \cdot r_{2\partial}}{\omega_{0\partial} s_{\partial}}$, по якому роблять висновок з умови $M_{\partial} = (1{,}1 \div 1{,}15) M_{сн}$ про можливість процесу пуску і розгону АД при заданому, наприклад, номінальному навантаженні $M_{сн}$ на валу.

Визначивши з рівняння електричної рівноваги ЕРС $E_{1\partial}$ двигуна 4А71А2 по кривій $E = \varphi(x_m)$ уточнюють відповідне значення опору $x_{m\partial}$. Якщо різниця отриманого значення $x_{m\partial}$ з передбачуваним $x'_{m\partial}$ складає не більше, ніж ±5 %, то $x'_{m\partial}$ залишають у якості розрахункового. При більших відхиленнях попередньо приймають два значення $x'_{m\partial}$ та $x''_{m\partial}$, для кожного з яких знаходять ЕРС $E'_{1\partial}$, $E''_{1\partial}$. Значення у точці перетину $E'_{1\partial}$, $x'_{m\partial}$ та $E''_{1\partial}$, $x''_{m\partial}$ з кривою $E = \varphi(x_m)$ (рис. 2) приймають за розрахункове $x_{m\partial}$ та $E_{1\partial}$. Відповідність їх з кривою залежності $E = \varphi(x_m)$ дає уточнене значення намагнічуючого струму I_0, реактивної потужності Q_0 основного магнітного поля, cos φ АМ.

За результатами розрахунку для декількох значень $\boldsymbol{s}_{\partial}$ у діапазоні $\boldsymbol{s}_{\partial p} \le \boldsymbol{s}_{\partial} \le 1$ будують зовнішню характеристику ААГ $U = f(I_{\partial})$, механічну характеристику АД $M_{\partial} = f(\boldsymbol{s}_{\partial})$, що застосовуються у порівняльному аналізі з характеристиками інших варіантів автономних електромеханічних комплексів з асинхронними машинами. У розрахунку пускових і робочих характеристик АЕК з серійними асинхронними машинами ААГ-АД єдина ємність C (опір ємності x_C) для їх збудження вибирається з умови повної компенсації реактивної потужності для обох машин (повного збудження їх по основному полю і полю розсіювання) в окремих заданих режимах, наприклад, при номінальному навантаженні АД в усталеному режимі і під час пуску. Так, номінальний робочий режим АД 4А71А2 під час живлення його від ААГ 4А71В2 забезпечується при x_C =120 Ом, при цьому ААГ АЕК створює напругу фази U=235 В при E_1=232 В, x_m=206,3 Ом, споживаючи на збудження основного потоку реактивну потужність Q_0=256,6 ВАр, а в цілому при врахуванні розсіювання Q_z=291,5 ВАр, cos φ =0,726. АД споживає на фазу активну потужність P_{∂}=311 Вт, реактивну Q_{∂} =122,3 ВАр, cos φ =0,93, при $\boldsymbol{s}_{\partial н}$=0,0565 створюється на валу момент $M_{\partial н}$=2,54 Нм, близький до номінального.

Зі зміною x_C у діапазоні 100÷140 Ом ААГ створює ЕРС E_1=(248÷208) В при плавній зміні x'_{m1} =(156÷287) Ом (рис. 3). АЕК працює усталено, хоча відбувається зміна напруги U і моменту $M_д$=(3,08÷2,1) на валу АД. У вище наведеному усталеному процесі при відносно малому ковзанні АД і значному опорі x_C конденсаторів реактивна складова їх загального опору $Z = r - jx$ має ємнісний характер і по величині значно перевищує індуктивні складові (X_{10}, X_2) у послідовно з'єднаному колі фази АЕК Т-подібної схеми ААГ. Зберігається значна величина ємнісного характеру і $(-jX_{1e}) = -jX + jX_{10}$ (рис. 3).

З ростом ковзання $s_д$ АД (при перенавантаженні) і незмінному x_C (наприклад, x_C =120 Ом) відбувається зміна опорів $Z_{2д}$, $Z_д$, що призводить до зниження опорів Z, Z_{1e} та їх ємнісних складових $(-jx; -jx_{1e})$, наближує їх по величині з невеликими індуктивними порами обмоток генератора, у склад яких входять X_{10} статора, X_2 ротора.

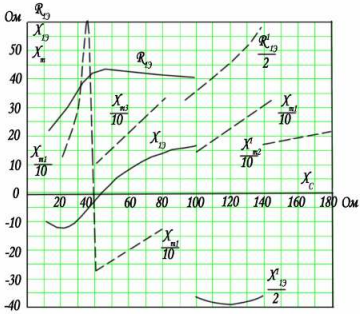

Рис. 3. Графіки залежностей активної R_{1e}, реактивної X_{1e} складових еквівалентного опору фази АЕК з АД 4А71А2 та ААГ на базі серійного АД 4А71В2 і опору x_m намагнічуючого контуру генератора від ємнісного опору x_C на виході генератора у режимі пуску АД (R_{1e}, X_{1e}, x_m при $s_д$=1), в усталеному процесі АД при $s_д$=0,0565 (R'_{1e} , X'_{1e} , x'_{m1}), а також $x'_{m2} = \varphi(x_c)$ в усталеному процесі системи АД-КААГ при $x_{c\Delta}$=70 Ом, x_{m3} =φ(x_C) при $x_{c\Delta}$ =70 Ом, x_{ck}=70 Ом при пуску АД у системі АД-УКААГ

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 $X_{1e} \cdot |Z_2|^2 - x_2 \cdot |Z_{1e}|^2 \to 0$ прямує до нуля і відбувається розрив функції з $x_m = \pm\infty$.

З урахуванням активних складових еквівалентного опору АЕК кидки струму, напруги обмежені за величиною, але є неприпустимими

з умов експлуатації. У прикладі, що розглядається АЕК ААГ-АД з $x_C = 120$ Ом кидки опору кола намагнічування змінюється у межах x_m=(+1420÷–16000) Ом відбуваються вже при ковзанні двигуна s_∂ =0,16÷0,18, що по величині і знаку виводять x_m за межі типової кривої намагнічування $E = \varphi(x_m)$ і призводять порушення фізичних умови його роботи (намагнічування). До особливо важких наслідків призводять такі явища під час роботи АЕК в екстремальних умовах, наприклад, під час пуску та розгону робочого двигуна. Відомо, що значна величина його струму знижує напругу у колі з обмеженою потужністю генератора, що зменшує в свою чергу малий пусковий момент, ускладнює умови пуску і розгону двигуна. Для стабілізації рівня напруги і створення умов пуску і розгону АД необхідно застосувати за величиною ємність у 4-5 раз більшу, ніж в усталеному робочому процесі.

Аналогічно з форсуванням збудження синхронного генератора у автономному електромеханічному комплексі з СГ-АД зазначене вище збільшення пускової ємності є також форсуванням, але ємнісного збудження АМ. Форсування збудження синхронного генератора відбувається за рахунок незначної витрати потужності постійного струму збудження (збуджує себе СГ без ємнісних елементів і віддає реактивну потужність споживачу), а отже резонансні явища у колі АЕК з СГ відсутні. У АЕК з ААГ-АД під час пуску двигуна стрімко збільшується витрата реактивної потужності змінного струму для збудження обох АМ і виробіток її загальною ємністю. Наявність у колі нелінійних АМ та електричної ємності супроводжується ймовірністю виникнення небажаних ферорезонансних явищ. Так, при x_C =24 Ом процес пуску АД відбувається задовільно, момент складає $M_{\partial n}$=3,02 Нм≈1,19M_0, напруга U=180 В (E_1=223 В, x_m =242 Ом). При розгоні двигуна зі зменшенням ковзання s_∂ при x_C =const можуть виникати недопустимі перенапруги в АЕК, для виключення яких необхідно плавно або ступінчато зменшувати ємність C до необхідного значення в усталеному режимі. Відхилення x_C від розрахункового значення (наприклад, x_C від 30-40 Ом при $s_{\partial n}$=1) призводить до зменшення опору Z зовнішнього кола АЕК і його ємнісної складової з $(-jx)$ на $\left|-jx\right| \approx \left|jx_{10} + jx_2\right|$ при $x_m = \infty$ (4.б).

У випадку рівності ємнісного та індуктивного опорів еквівалентного кола створюються умови виникнення ферорезонансу напруг, який супроводжуватиметься кидками струму комплексу, моменту двигуна і призводить до порушення умов стійкої роботи автономного електромеханічного комплексу.

Критерієм та умовою стійкої спільної роботи АЕК є опір кола на-

магнічування 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 $E=f(X_m)$.

Причиною виникнення резонансних явищ у колі фази АЕК є єдина для їхнього збудження ємність C, яка разом із робочим двигуном створює зовнішній активно-ємнісний опір по відношенню до активно-індуктивного опору генератора.

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, тобто за повної компенсації його реактивної потужності, 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 деякою мірою відповідає компенсований автономний асинхронний генератор (КААГ) та повністю відповідає його узагальнена модифікація – УКААГ із внутрішнім ємнісним збудженням [8].

КААГ виконується на базі тієї ж серійної трифазної АМ з короткозамкненим ротором, що і ААГ, без зміни його конструкції. При цьому фазна зона його обмотки статора 60^o розділяється на дві однакові за кількістю витків частини з їх просторовим зміщенням у пазах обмотки статора одна відносно одної на 30^o та включенням за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) на внутрішню електричну ємність C_Δ (рис. 1, б).

КААГ та АД співставної потужності стійко працюють в усталеному режимі за номінального навантаження. Внутрішня ємність C_Δ 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_Δ не здатна взя-

ти 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_Δ утворюють змішане збудження КААГ, а разом із зовнішньою ємністю C збудження АЕК має загальний характер. Генератор із повним комплексом ємностей збудження C, C_Δ, 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.

Для розрахунку характеристик УКААГ або його часткових варіантів складені рівняння електричної рівноваги:

1) $\dot{U} = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 - jX_1 \cos\theta \cdot \dot{I}_\Delta = \dot{I}Z$ – для основної обмотки

2) $\dot{U} = \dot{U}_\Delta - \dot{U}_{C\Delta} = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_1 - jX_1 \cos\theta \cdot \dot{I}_1 + jX_{C\Delta}\dot{I}_{C\Delta}$ – для кола додаткової обмотки статора

3) $\dot{U}_\Delta = \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta Z_1 - jX_1 \cos\theta \cdot \dot{I}_1 = -jX_{Ck}\dot{I}_{Ck}$ – для контуру додаткової обмотки статора та ємності C_k;

4) $0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2$ – для фази обмотки ротора.

На рис. 3 наведені деякі результати розрахунку характеристик під час пуску робочого АД 4А71В2 від УКААГ на базі АМ 4А71В2. Нормальний пуск робочого АД із пусковим моментом $M_{\partial n}$ = 3,045 $H_м$ = 1,2$M_{\partial н}$ відбувається при X_C = 55 Ом, $X_{C\Delta} = X_{Ck}$ = 70 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.

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. На відміну від інших автономних комплексів із АМ лише комплекс УКААГ+АД виявляється працездатним у режимах пуску та розгону АД спів ставної із генератором потужності. Такий пуск здійснюється при 3-4 кратному збільшенні сумарної ємності збудження порівняно із її величиною для нормального режиму роботи. Для уникнення перезбудження та виникнення перенапруг в АЕК під час розгону АД слід переключати конденсатори для прикладу, що розглядається із варіанту УКААГ+АД із X_C / $X_{C\Delta}$ / X_{Ck} = 55 / 70 / 70 Ом на варіант КААГ+АД із X_C / $X_{C\Delta}$ = 180 / 70 Ом. Тобто зі зміною сумарної ємності збудження приблизно у 3 рази, тоді як у комплексі із ААГ+АД під час пуску АД співставної потужності необхідно збільшувати ємність збудження у 5 разів. П'яти кратним також приймається форсування збудження під час пуску АД, який отримує живлення від СГ.

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.

Надійшла до редколегії 29.09.2012

УДК:621.313.322

Сумісна робота різнорідних асинхронних машин в автономному електромеханічному комплексі / Мішин В.І., Чуєнко Р.М., Макаревич С.С. //

Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 49-60. Бібліогр.: 8 назв.

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

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

To guarantee stable operation of heterogeneous induction generator and motor of commensurable power in the autonomous electromechanical complex, it is proposed to distribute capacities of the machines excitation by separate electric circuit loops which are not connected by conditions of the ferroresonance of voltages.

Keywords: autonomous electromechanical complex, induction generator, induction motor, capacitive excitation, ferroresonance of voltages, resistance of magnetizing circuit.