

УМОВИ СТІЙКОЇ СУМІСНОЇ РОБОТИ РІЗНОРІДНИХ АСИНХРОННИХ МАШИН В АВТОНОМНОМУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ

*В.І. Мішин, доктор технічних наук
Р.М. Чуєнко, кандидат технічних наук
С.С. Макаревич, інженер*

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.

Автономний електромеханічний комплекс, асинхронний генератор, асинхронний двигун, ємнісне збудження, ферорезонанс напруг, опір контуру намагнічування.

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. Проте суміщення в одному 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 короткозамкнутим ротором унеможливується 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).

Методика досліджень. 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 потужностей 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].

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

$$\begin{aligned} \dot{U} &= -\dot{E}_{10} + \dot{I}_{01}Z_{10} = \dot{I}_0 Z_0, \quad 0 = -\dot{E}_{20} + \dot{I}_{20}Z_{20} \quad (\text{для АД}); \\ \dot{U} &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_{10} = \dot{I}Z, \quad 0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (\text{для АГ}). \end{aligned} \quad (1)$$

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 $s_{op} \leq s_o \leq 1$ при заданій ємності C , заданих постійних параметрах [5] Т-подібної схеми заміщення АМ (рис. 1, а). Змінні реактивні опори намагнічуючих контурів (x_m – генератора і x_{m0} – двигуна) задані лише побічно кривою намагнічування асинхронної машини [6] і потребують попереднього визначення.

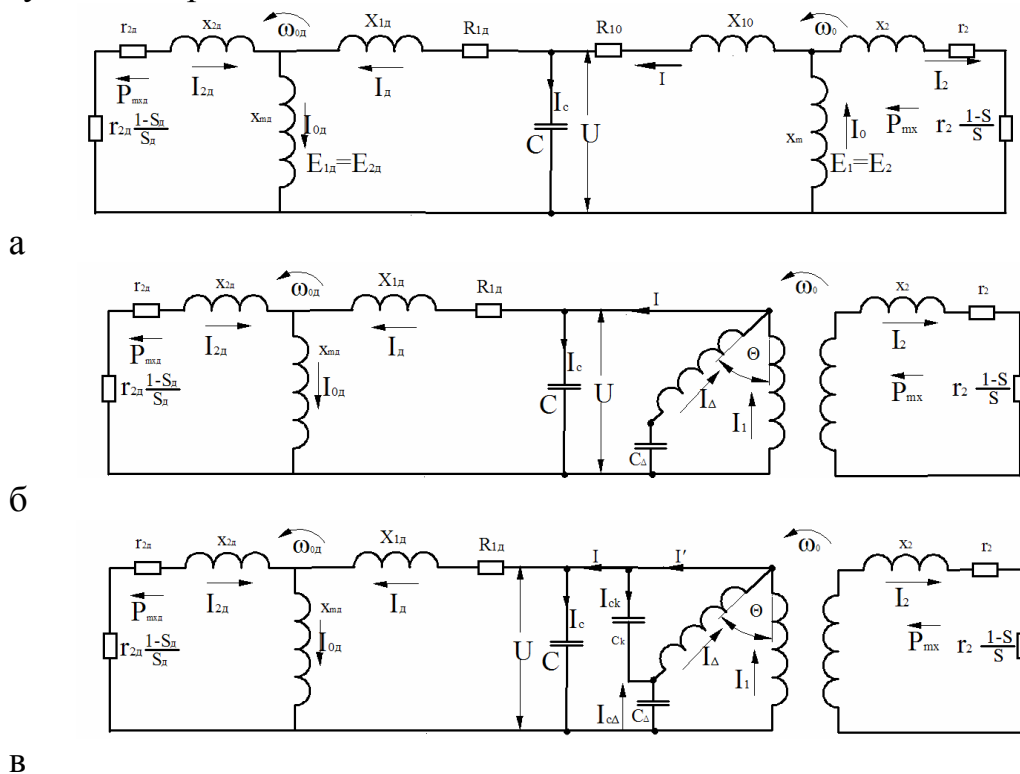


Рис. 1. Принципові електричні схеми МЕК з асинхронними машинами:
а) АД-ААГ; б) АД-КААГ; в) АД-УКААГ

Для ряду однотипних АМ певного відрізка 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 4A71A2 та 4A71B2.

Для визначення ЕРС \dot{E}_1 (1.6), струму 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 $E_{1\partial n} \ll U$), а за кривою $E = \varphi(x_{m\partial})$ (рис. 2) визначається збільшення величини опору $x_{m\partial}$ та зменшення ЕРС двигуна.

У відповідності із розрахунковим методом послідовних наближень слід прийняти попередню величину опору кола намагнічування $x_{m\partial}$ при заданому режимі роботи (s_∂). 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.

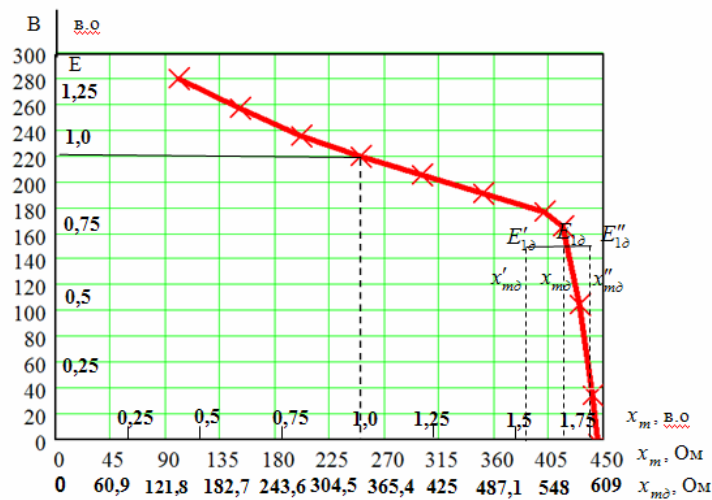


Рис. 2. Графік залежності $E = \varphi(x_m)$ на основі типової кривої намагнічування асинхронної машини АИР 71В2 - x_m і АИР 71А2 - $x_{m\partial}$

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:

$$i = \frac{\dot{E}_1}{Z_{10} + Z} = \frac{\dot{E}}{Z_{1r}}, \quad i_2 = \frac{\dot{E}_2}{Z_2} \quad \text{з (1.6)}, \quad i_0 = j \frac{\dot{E}_1}{x_m} \quad (2)$$

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 власному опорі фази обмотки статора ААГ, який становить $Z_{10} = R_{10} + jX_{10}$; R_{10} та X_{10} - активний та реактивний опір розсіювання [5]; $R_{1e} = r + R_{10}$; $-jX_{1e} = -jx + jX_{10}$; r , $(-jx)$ - складові опорів $Z = r - jx$; $Z_2 = \frac{r_2}{s} + jx_2$ - опір фази кола ротора ААГ.

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

$$r_2/s = -\frac{|Z_{1e}|^2}{2R_{1e}} \pm \sqrt{\frac{|Z_{1e}|^4}{4R_{1e}^2} - x_2^2}, \quad x_m = \frac{|Z_{1e}|^2 \cdot |Z_2|^2}{X_{1e} \cdot |Z_2|^2 - x_2 \cdot |Z_{1e}|^2} \quad (4)$$

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 s_δ визначають струм $\dot{I}_\delta = \frac{\dot{U}}{Z_\delta}$, ЕРС $\dot{E}_{1\delta} = \dot{E}_{2\delta} = -\dot{U} + \dot{I}_\delta Z_{1\delta}$, струм ротора $\dot{I}_{2\delta} = \frac{\dot{E}_{2\delta}}{Z_{2\delta}}$ при

$Z_{2\delta} = \frac{r_{2\delta}}{s_\delta} + jx_{2\delta}$ і обертовий електромагнітний момент $M_\delta = m \frac{I_{2\delta}^2 \cdot r_{2\delta}}{\omega_{0\delta} s_\delta}$, по якому

роблять висновок з умови $M_\delta = (1,1 \div 1,15)M_{сн}$ про можливість процесу пуску і розгону АД при заданому, наприклад, номінальному навантаженні $M_{сн}$ на валу.

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

У випадку рівності ємнісного та індуктивного опорів еквівалентного кола АЕК 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 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 $E=f(X_m)$.

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 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° розділяється на дві однакові за кількістю витків частини з їх просторовим зміщенням у пазах обмотки статора одна відносно одної на 30° та включенням за схемою поворотного автотрансформатора (АТ) на внутрішню електричну ємність C_A (рис. 1, б).

КААГ та АД співставної потужності стійко працюють в усталеному режимі за номінального навантаження. Внутрішня ємність C_A 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.

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 $M_{\text{он}} = 3,045 \text{ Нм} = 1,2M_{\text{он}}$ відбувається при $X_C = 55 \text{ Ом}$, $X_{C1} = X_{Ck} = 70 \text{ Ом}$ 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.

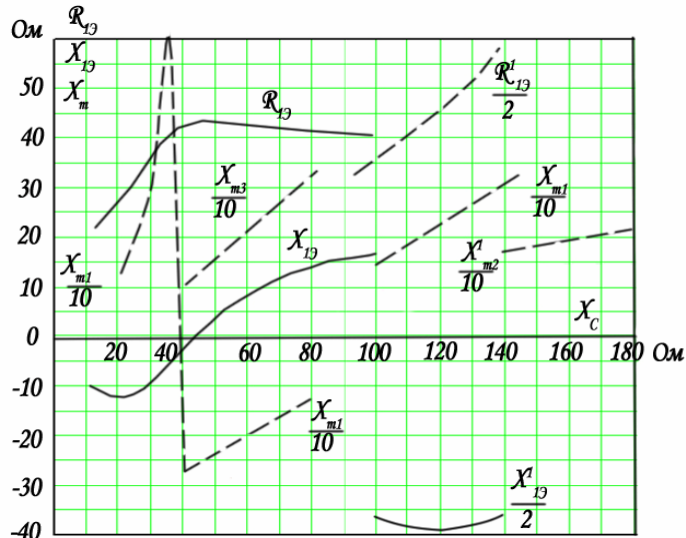


Рис. 3. Графіки зміни параметрів системи АД-УКААГ

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 співставної 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 $X_C / X_{C1} / X_{Ck} = 55 / 70 / 70 \text{ Ом}$ на варіант КААГ+АД із $X_C / X_{C1} = 180 / 70 \text{ Ом}$. 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 використаних джерел

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.

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

Автономный электро-механический комплекс, асинхронный генератор, асинхронный двигатель, ёмкостное возбуждения, феррорезонанс напряжений, сопротивление намагничивающего контура.

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.

Autonomous electromechanical complex, asynchronous generator, induction motor, capacitance excitemen,t ferroresonance voltages.