Проанализирована актуальность вопросов повышения энергоэффективности систем очистки сточных вод агропромышленных объектов. Оценена степень энергопотребления процессов водоочистки разными методами. Рассчитан экономический эффект от экономии электроэнергии на водоочистку. Предложен и проверен критерий энергоэффективности функционирования системы управления водоочистительными электротехнологическими комплексами.

Водоочистка, сточные воды, водоочистительный электротехнический комплекс, система управления, экологическая безопасность.

Analyzes the actuality energy efficiency of agro-industrial wastewater treatment facilities; A degree of energy in different methods of water purification processes; The economic effects of energy savings for water treatment; proposed and tested standard energy management system electro-purifying systems.

Water treatment, sewage water treatment, complex electrical, management system, environmental security.

УДК 62 - 83 : 621. 313. 333

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ КОМПЕНСОВАНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Р.М. Чуєнко, кандидат технічних наук
О.А. Кривошей, студент

Обґрунтовано параметри схеми заміщення компенсованого асинхронного електродвигуна з урахуванням взаємоіндуктивного зв'язку між напівобмотками фаз статора як за основним полем, так і за полями розсіяння.

Компенсований асинхронний електродвигун, схема заміщення, активний та реактивний опір, розсіяння, взаємоіндуктивний зв'язок.

Основою для розрахунку характеристик асинхронного двигуна (АД) є система рівнянь електричної рівноваги кіл статора і ротора у симетричному усталеному режимі. Ці рівняння виражають частковий випадок загальної математичної моделі машини як для перехідних, так і усталених процесів, складеної при загальноприйнятих припущеннях класичної теорії електричних машин за постійних параметрів схеми заміщення [4].

© Р.М. Чуєнко, О.А. Кривошей, 2014

Для компенсованих асинхронних двигунів (КАД) за основу прийнята математична модель базового асинхронного двигуна і методика її побудови. Але враховуються конструктивні і функціональні особливості КАД. Зокрема при поділі обмотки статора на дві просторово зміщені між собою частини подвоюється кількість рівнянь електричної рівноваги фаз статора, а ввімкнення обмоток статора за схемою поворотного автотрансформатора на електричну ємність збільшує на одиницю порядок диференційних рівнянь електричної рівноваги фаз статора [3].

Мета досліджень – визначення параметрів схеми заміщення компенсованого асинхронного електродвигуна.

Матеріали та методика досліджень. Найповніше дані асинхронних електродвигунів наведено у довідковій літературі [1]. Зокрема наводяться параметри Г-подібної схеми заміщення (рис. 1, а), виражені у відносних одиницях (в.о.). При цьому розглядаються параметри обмоток статора (активний $R_1^{/}$ та індуктивний $X_1^{/}$ опори розсіювання) і ротора (відповідно $R_2^{//}$, $X_2^{//}$), опір взаємоіндуктивного зв'язку між обмотками фаз статора і ротора при збігу їх осей та рівний йому повний головний реактивний опір фази обмотки (X_m) у номінальному режимі роботи приведеного двигуна серії 4А, а також значення опорів обмоток при короткому замиканні двигуна $R_к$, $X_к$.

Проте результати розрахунків на базі математичної моделі АД в усталеному симетричному режимі приводять до Т-подібної схеми заміщення (рис. 1, б), яка краще відображає фізичні процеси у двигуні і по суті є його фізичною моделлю [2]. Тому, при математичному моделюванні АД доцільно використовувати параметри Т-подібної схеми заміщення.

При переході від заданих параметрів Г-подібної схеми до параметрів Т-подібної схеми використовують такі вирази [1, 4]:

$$X_1 = \frac{2X_1^{/}X_m}{X_m + \sqrt{X_m{}^2 + 4X_1^{/}X_m}};\ R_1 = R_1^{/}\frac{X_1}{X_1^{`}};\ R_2 = \frac{R_2^{//}}{c^2};$$

$$X_2 = \frac{X_2^{//}}{c^2},\ c \approx 1 + \frac{X_1}{X_m}\ \ \dot{I}_2 = c \cdot \dot{I}_2'.$$

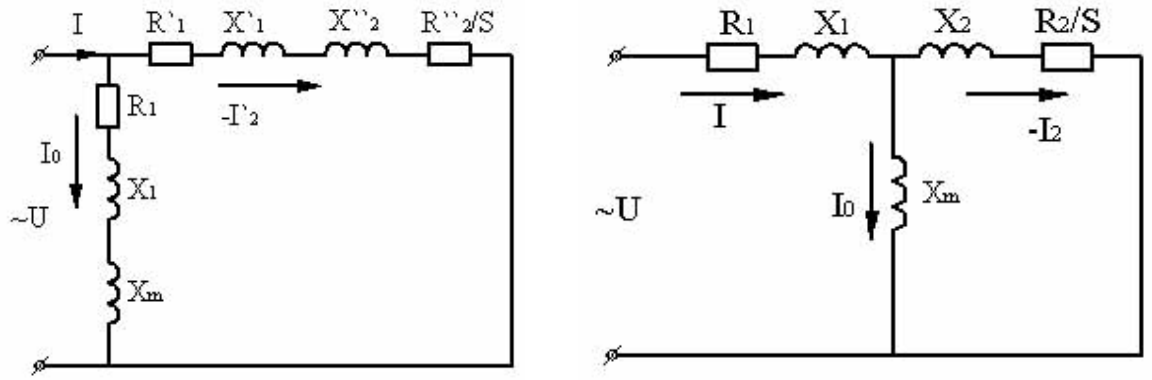
Співвідношення між параметрами у відносних $R_1(в.о.)$, $X_1(в.о.)$, $R_2(в.о.)$ ... та в абсолютних одиницях (Ом) мають вигляд:

$$R_1(в.о.) = \frac{R_1(Ом)}{Z_н(Ом)}\ \text{А};\ X_1(в.о.) = \frac{X_1(Ом)}{Z_н(Ом)};\ R_2(в.о.) = \frac{R_2(Ом)}{Z_н(Ом)}\ \ ...\ ,$$

де $Z_н = \frac{U_н}{I_н}$ – номінальний опір фази машини при з'єднанні обмотки статора Y, Ом; $I_н = \frac{P_н}{3 \cdot U_н \eta_н \cos\varphi_н}$ – номінальний струм, А; $U_н$ – номінальна напруга фази, В.

Результати досліджень. У компенсованих асинхронних двигунах (КАД) обмотка статора базового двигуна розділена на дві послідовно або

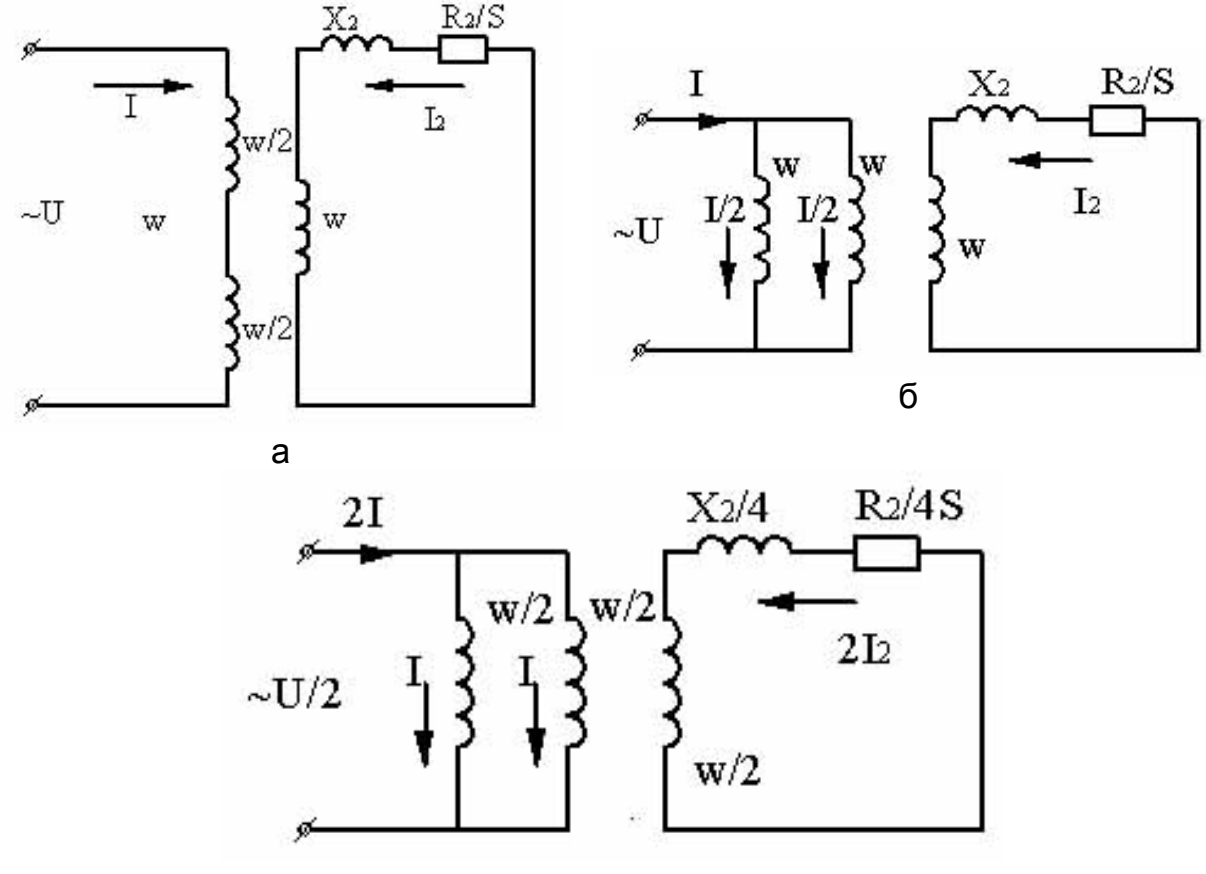
паралельно з'єднані напівобмотки. Тому для розрахунку характеристик КАД необхідно



а б

Рис. 1. Схема заміщення асинхронного двигуна:
а – Г-подібна; б – Т-подібна

враховувати параметри не лише всієї обмотки статора, а також її окремих напівобмоток. Принципові електричні схеми обмоток статора фази базового АД можна показано на рис. 2.



а б в

Рис. 2. Принципові електричні схеми фази АД:
а – при послідовному з'єднанні напівобмоток фази статора; б – при паралельному з'єднанні двох віток; в – при перемиканні послідовної обмотки у дві паралельні вітки

У схемі, наведеній на рис. 2, а, обмотка статора двигуна з кількістю витків *w* у фазі розділена на дві послідовні напівобмотки по $\frac{w}{2}$ витків у кожній. З умов приведення асинхронного двигуна кількості витків обмоток статора і ротора, та їх параметри у цілому повинні залишатися незмінними. Проте опір кожної напівобмотки статора при послідовному їх з'єднанні буде дорівнювати половині опору всієї обмотки, тобто активний опір напівобмотки фази статора буде дорівнювати $\frac{R_1}{2}$, повний реактивний опір розсіяння напівобмотки фази статора – $\frac{X_1}{2}$, повний головний опір напівобмотки фази статора – $\frac{X_m}{2}$, де X_1, X_m – опір розсіяння та повний головний реактивний опір фази всієї обмотки статора, пропорційні w^2 [2]. Відомо, що повний реактивний опір фази обмотки двигуна має складову власного опору, пропорційну квадрату кількості її витків та складову взаємоіндуктивного зв'язку з іншими обмотками, пропорційну добутку кількостей витків обмоток. Причому вважається, що взаємоіндуктивний зв'язок між різними обмотками по полю розсіювання відсутній.

Залежність власних реактивних опорів обмоток від квадрата їх кількостей витків визначають для напівобмоток відповідно за опорами розсіювання $X_{1C} = \frac{X_1}{4} \equiv \left(\frac{w}{2}\right)^2$ та за головним опором $X_{mc} = \frac{X_m}{4} \equiv \left(\frac{w}{2}\right)^2$.

Невідповідність між повними опорами послідовних напівобмоток $\frac{X_1}{2}, \frac{X_m}{2}$ та їх власними значеннями $X_{1C} = \frac{X_1}{4}$, $X_{mc} = \frac{X_m}{4}$ обумовлюється наявністю між напівобмотками у межах єдиної обмотки взаємоіндуктивного зв'язку як за основним полем, так і за полем розсіяння, що збільшує їх опір ще на величину $X_{1b} = \frac{X_1}{4} \equiv \left(\frac{w}{2}\right)^2$ за рахунок взаємоіндуктивного зв'язку між напівобмотками по полю розсіяння та на величину $X_{mb} = \frac{X_m}{4} \equiv \left(\frac{w}{2}\right)^2$ – за основним магнітним потоком.

Тобто, реактивний опір розсіяння кожної з послідовних напівобмоток статора, розміщених співвісно під усіма полюсами дорівнює $\frac{X_1}{2} = X_{1c} + X_{1b} = \frac{X_1}{4} + \frac{X_1}{4}$, головний реактивний опір – $\frac{X_m}{2} = X_{mc} + X_{mb} = \frac{X_m}{4} + \frac{X_m}{4}$, а опір взаємоіндукції напівобмоток статора з обмоткою ротора відповідно – $\frac{X_m}{2} \equiv \frac{w}{2} \cdot w$.

Слід зазначити, що взаємоіндуктивний зв'язок за основним полем в асинхронній машині має місце між усіма обмотками статора і ротора всіх фаз, що враховується в математичній моделі електричної машини [3–5].

А поле розсіяння зчіплюється лише із напівобмотками власної фази. При розділенні такої обмотки на дві частини, які лежать співвісно в одних і тих самих пазах, взаємоіндуктивний зв'язок між напівобмотками єдиної обмотки враховується опором $X_{1b} = \frac{X_1}{4}$, при просторовому зміщенні таких напівобмоток один відносно одного на кут *δ* (як прийнято у КАД) цей опір стає рівним $\frac{X_1}{4} \cdot \cos\delta$.

Якщо базовий двигун має обмотку статора з двома однаковими паралельними вітками, кожна з яких розрахована на повну напругу мережі U (рис. 2, б), то за умови паралельного з'єднання при параметрах єдиної обмотки $R_1,\ X_1,\ X_m$ параметри паралельної вітки будуть дорівнювати відповідно $2R_1,\ 2X_1,\ 2X_m$, а при загальному номінальному струмі $I_н$ номінальний струм паралельної вітки становитиме $\frac{I_н}{2}$. При збереженні кількості витків вітки *w*, яка дорівнює кількості витків єдиної обмотки, їх власний реактивний опір розсіяння і головний реактивний опір, а також опір взаємоіндуктивного зв'язку по полю розсіяння та по основному полю у межах єдиної обмотки зберігають свої значення, які дорівнюють опорам всієї обмотки, тобто $X_{1c} = X_{1b} = X_1,\ X_{mc} = X_{mb} = X_m$, звідки опір вітки буде становити $X_{1c} + X_{1b} = 2X_1,\ X_{mc} + X_{mb} = 2X_m$. Параметри ротора при цьому залишаються незмінними $R_2,\ X_2,\ X_m$.

На практиці інколи виникає необхідність обмотку статора переключити з послідовного на паралельне з'єднання напівобмоток по $\frac{w}{2}$ витків у вітці (рис. 2, в). Для збереження енергетичних показників двигуна за схемами рис. 2, б і рис. 2, в напруга живлення має бути зменшена вдвічі ($\frac{U}{2}$), а загальний струм статора і струм ротора збільшені вдвічі (відповідно $2I,\ 2I_2$), при цьому струми паралельних віток статора будуть дорівнювати *I*. У кожній паралельній вітці статора з кількістю витків $\frac{w}{2}$ опір розсіяння дорівнює $\frac{X_1}{2} = \frac{X_{1c}}{4} + \frac{X_{1b}}{4}$, загальний опір $\frac{X_m}{2} = \frac{X_{1c}}{4} + \frac{X_{mb}}{4}$, а загальні параметри всієї обмотки статора – відповідно $\frac{X_1}{4}, \frac{X_m}{4}, \frac{R_1}{4}$. З умови приведення асинхронного двигуна кількість витків обмотки ротора приведеної до обмотки статора теж має бути $\frac{w}{2}$, що зменшує його опір розсіяння до $X_2' = \frac{X_2}{4}$, а активний опір обмотки ротора з урахуванням подвоєння його струму стає рівним $R_2' = \frac{R_2}{4}$.

Висновки

Фазні обмотки статора компенсованих асинхронних двигунів утворюються шляхом поділу обмоток базового двигуна на дві частини, які лежать співвісно в одних і тих самих пазах або з просторовим зміщенням. При цьому змінюється характер взаємоіндуктивних зв'язків як між обмотками різних фаз, так і між окремими напівобмотками у межах єдиної фазної обмотки. Тому, для розрахунку характеристик компенсованих двигунів необхідно застосовувати відповідні параметри схеми заміщення.

Список літератури

1. Асинхронные двигатели серии 4А: справ. / [А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др.]. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1974. –840 с.
3. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [В.І. Мішин, В.В. Каплун, Р.М. Чуєнко та ін.]. – К.: КНУТД, 2012. – 221 с.
4. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин / И.П. Копылов. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
5. Мишин В.И. Моделирование аварийных режимов электродвигателей в сельськом хозяйстве / В.И. Мишин, И.В. Собор. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 127 с.

Обоснованны параметры схемы замещения компенсированного асинхронного двигателя с учетом взаимоиндуктивной связи между полуобмотками фаз статора как по основному полю, так и по полям рассеяния.

Компенсированный асинхронный электродвигатель, схема замещения, активное и индуктивное сопротивление, рассеяние, взаимоиндуктивная связь.

The parameters of compensated induction motor circuit model considering mutual inductive coupling between phase stator semi-windings as for basic field so leakage fields were grounded.

Compensated induction motor, circuit model, active and inductive resistance, dispersion, mutual inductive communication.