

4. Сотников А.Г. Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции/А.Г. Сотников. – Л.: Машиностроение, 1984 – 240 с.

5. Чумак И.Г. Холодильные установки / И.Г. Чумак, В.П. Чепуренко. – М.: Агропромиздат, 1991 – 495 с.

*Приведено математическое описание процессов хранения плодово-овощной продукции с использованием машинного охлаждения. Разработана автоматическая система управления, которая реализует импульсный режим охлаждения.*

***Холодильное оборудование, плодовоовощехранилище, хранение, автоматическое управление.***

*The mathematical description of the processes produce storage using machine cooling, and developed an automated control system that implements pulse cooling.*

***Refrigeration equipment, storage for fruits and vegetables, storage, automatic control.***

УДК 62 - 83 : 621. 313. 333

## **РЕЗОНАНСНІ РЕЖИМИ В КОМПЕНСОВАНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ**

***В.В. Гаврилюк, асистент***

*Розглянуто умови виникнення резонансних режимів у компенсованих асинхронних двигунах у пускових та номінальних режимах. Обґрунтовано вплив резонансів напруг та струмів на роботу двигунів.*

***Асинхронний двигун, компенсація реактивної потужності, резонанс.***

Необхідність асинхронних електроприводів зі зменшеним споживанням реактивної потужності зумовила появу компенсованих асинхронних двигунів (КАД) [4,5]. Особливості будови цих електродвигунів, а саме, наявність у них індуктивних  $L$  (обмотка двигуна) та одночасно ємнісних  $C$  елементів (рис.1) у певних режимах роботи можуть призвести до виникнення резонансних явищ. При резонансі можливе збільшення струму в обмотках двигуна, що призведе до перегрівання останніх та виходу їх з ладу. Існуючі праці, присвячені КАД [4,5], не розкривають проблеми виникнення резонансів. Тому це питання є нині актуальним і потребує ґрунтовного вивчення.

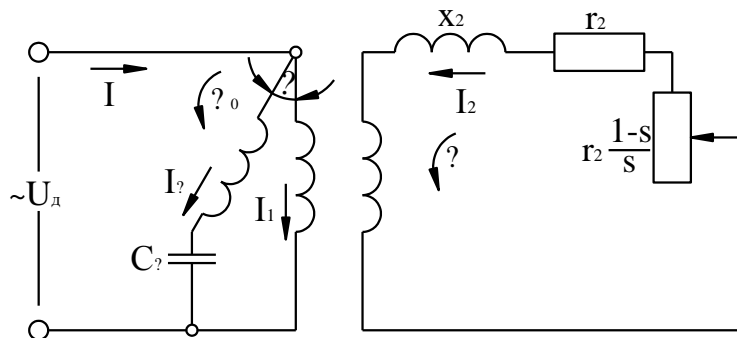
**Мета досліджень** – вивчення КАД щодо виникнення резонансних режимів у його обмотках при різних режимах роботи.

**Матеріали та методика досліджень.** Об'єктом дослідження є резонансні процеси в компенсованих асинхронних двигунах. Вирішення поставлених завдань проводилось на основі методів теорії кіл.

**Результати досліджень.** Відомо, що резонансним режимом роботи є такий, при якому вхідний опір є чисто активним [2]. Оскільки резонанс напруг виникає при послідовному з'єднанні  $L$ ,  $C$  елементів, то він можливий у додатковій напівобмотці двигуна (рис.1). За умовою виникнення резонансу струм  $I_{\Delta}$  в напівобмотці повинен збігатися за фазою з напругою двигуна  $U_{\partial}$ . Опір кола з додатковою напівобмоткою буде:

$$z_{\Delta} = r_{\Delta} + jx_{\Delta} + \frac{1}{\omega_0 C_{\Delta}}, \quad (1)$$

де  $r_{\Delta}$  – активний опір додаткової напівобмотки КАД, Ом;  $x_{\Delta}$  – індуктивний опір додаткової напівобмотки, Ом;  $C_{\Delta}$  – ємність конденсатора, мкФ.



**Рис.1. Схема заміщення компенсованого асинхронного двигуна**

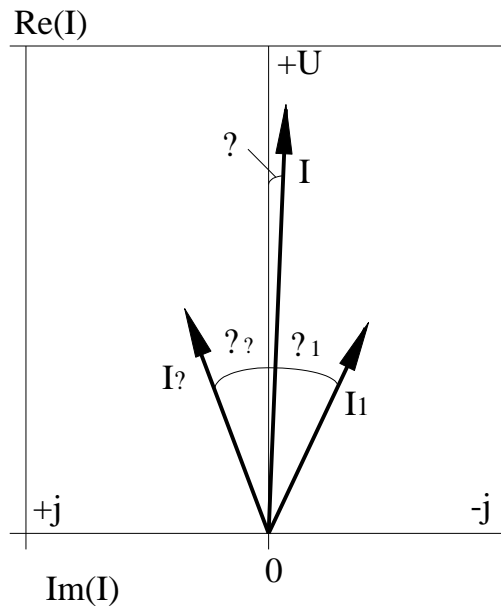
З цього співвідношення витікає, що струм додаткової напівобмотки  $\dot{I}_{\Delta}$  з врахуванням взаємоіндуктивного зв'язку з первинною, або основною напівобмоткою, описується рівнянням:

$$\dot{I}_{\Delta} = \frac{\dot{U}_{\partial} + \dot{E}_{\Delta} - \dot{I}_1 jx_1 \cos(\theta)}{z_{\Delta} - j \frac{1}{\omega_0 C_{\Delta}}}, \quad (2)$$

де  $\dot{E}_{\Delta}$  – ЕРС додаткової напівобмотки статора КАД [4,5], В;  $\dot{I}_1$  – струм основної напівобмотки статора, А;  $x_1$  – індуктивний опір основної напівобмотки, Ом;  $\theta$  – кут між основною та додатковою напівобмотками, градус електричний.

Вектор повного струму  $\dot{I}_1$  статора КАД повинен бути якомога ближче до вектора напруги двигуна  $\dot{U}_{\partial}$ , чим забезпечиться найменше споживання реактивної потужності КАД. Цей струм визначається як сума ємнісного струму  $\dot{I}_{\Delta}$  додаткової напівобмотки та індуктивного  $\dot{I}_1$  основної  $\dot{I} = \dot{I}_{\Delta} + \dot{I}_1$ . Тому, в номінальному режимі роботи КАД завжди матиме реактивну складову, тобто

можливість виникнення резонансу виключається. Струм  $\dot{I}_\Delta$  регулюється ємністю конденсатора  $C_\Delta$ , що витікає з формули (2).



**Рис.2. Векторна діаграма струмів КАД**

Відомо, що в процесі пуску під навантаженням КАД потребує в кілька разів більшої ємності конденсатора в порівнянні з ємністю для номінального режиму роботи, а сам процес пуску супроводжується зміною ЕРС напівобмоток статора, яка описується співвідношенням:

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

де  $x_m$  – головний опір намагнічуючого контуру, Ом;  
 $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{-j\theta} + \dot{I}_2$  – струм намагнічування КАД, А;  $\dot{I}_2$  – струм ротора, А.

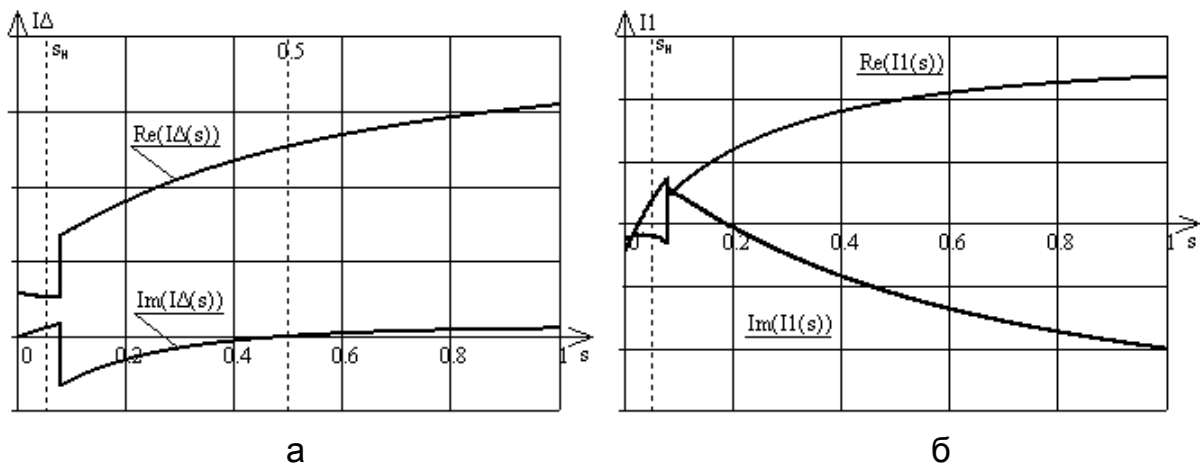
Це призводить до зміни як активної, так і реактивної складових струмів двигуна під час його пуску (рис.3). Так, на рис. 3,а зображені функції зміни активного  $Re(I_\Delta)=f(s)$  та реактивного  $Im(I_\Delta)=f(s)$  струмів під час пуску КАД. При цьому його реактивна складова в деякий момент часу дорівнює нулю  $Im(I_\Delta)=0$  (при  $s=0,5$ ). Це свідчить про те, що струм суто активний і в цей момент часу в додатковій обмотці КАД виникне резонанс напруг. Явище резонансу характеризується добротністю контуру  $Q$ , яка свідчить у скільки разів напруга на обмотці або конденсаторі перевищує напругу джерела живлення у резонансному режимі [2]:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}. \quad (4)$$

Оскільки індуктивність обмотки  $L = \frac{x_L}{\omega_0}$ , то формула (4) матиме вигляд:

гляд:

$$Q = \frac{\omega_0 (x_L / \omega_0)}{R} = \frac{x_L}{R}. \quad (5)$$



**Рис. 3. Графіки зміни активних та реактивних струмів додаткової  $I_{\Delta}$  (а) та основної  $I_1$  (б) напівобмоток статора в процесі пуску КАД**

В електричних двигунах потужністю до 11 кВт найбільшому значенню добротності  $Q$  індуктивно-ємнісного контуру напівобмотки КАД відповідає двигун зі значенням активного опору  $R_1=0,43$  в.о. та індуктивного  $X_1=0,085$  в.о. Цій умові відповідає асинхронний двигун потужністю 11 кВт, 1000 об/хв [1]. Враховуючи, що активний опір  $r_1$  напівобмотки КАД становить  $r_1=2R_1$  та (5), добротність контуру буде:

$$Q = \frac{x_{\Delta}}{r_1} = \frac{0,085}{2 \cdot 0,43} = 0,99.$$

Таким чином, у режимі резонансу напруга на додатковій напівобмотці не перевищуватиме  $0,99U_n$ , свого номінального значення. Таке твердження справедливе і для основної напівобмотки, оскільки вона має ті ж значення активного  $R_1$  та індуктивного  $X_1$  опорів, що й додаткова, а резонанс у ній може виникнути в процесі розгону (рис. 3,б) за рахунок впливу ємнісного струму  $\dot{I}_{\Delta}$  через взаємоіндуктивний зв'язок основної напівобмотки з додатковою:

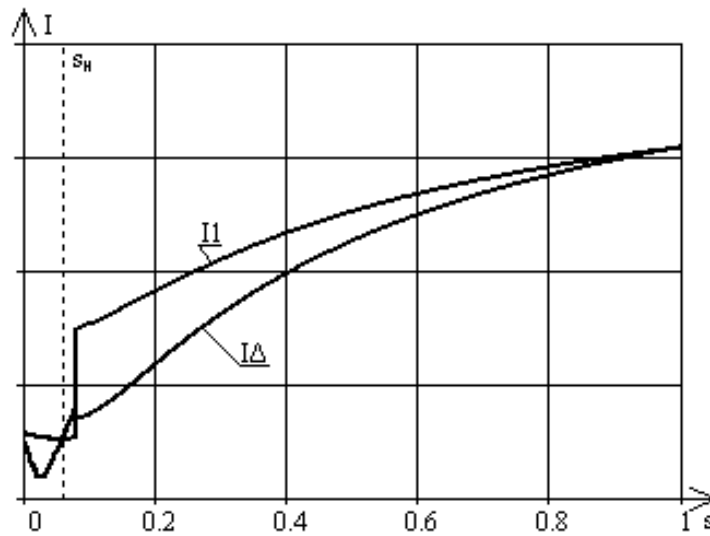
$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\partial} + \dot{E}_1 - \dot{I}_{\Delta} jx_1 \cos(\theta)}{z_1}. \quad (6)$$

Резонанс струмів у паралельних напівобмотках КАД за визначенням настане тоді, коли струм двигуна  $\dot{I}$  збігатиметься за фазою з напругою [2].

Такий режим роботи КАД досить ефективний, оскільки всю реактивну потужність, необхідну для його збудження забезпечуватиме конденсатор  $C_{\Delta}$ , і двигун споживатиме з мережі суто активну потужність.

Однак на практиці в номінальному режимі роботи КАД працює в режимі, близькому до резонансного. Це пояснюється необхідністю рівності струмів  $\dot{I}_1$  та  $\dot{I}_{\Delta}$  що обумовлює рівність втрат в обох напівобмотках та однаковий тепловий режим у них (рис. 4). У цьому режимі загальний струм  $\dot{I}$  двигуна не буде чисто активний (див. рис. 2), але в процесі роботи КАД можливі зміни навантаження, які спричинятимуть такий перерозподіл струмів у його напів-

бмотках, що призведе до збігу струму двигуна  $\dot{I}$  за фазою з напругою його живлення  $\dot{U}_\Delta$  і до виникнення резонансу струмів.



**Рис. 4. Графіки зміни струмів основної  $I_1$  та додаткової  $I_\Delta$  напівобмоток статора в процесі пуску КАД**

Згідно зі схемою заміщення (див. рис. 1) повний опір фази статора буде:

$$z_d = \frac{z_1 \left( \frac{1}{\omega_0 C_\Delta} + z_\Delta \right)}{z_1 + \frac{1}{\omega_0 C_\Delta} + z_\Delta} + \frac{j x_m z_2}{z_2 + j x_m}. \quad (7)$$

Звідки активний опір:

$$r_d = \frac{r_1 r_\Delta}{r_1 + r_\Delta} + \frac{r_2}{s} \quad (8)$$

та індуктивний:

$$x_d = \frac{x_1 x_\Delta}{x_1 + x_\Delta} + \frac{x_m x_2}{x_2 + x_m}. \quad (9)$$

Відповідно до джерел [1, 3] та формул (5), (8), (9) робимо висновок, що добротність контурів КАД на основі двигунів потужністю до 11 кВт при роботі в режимі резонансу струмів не перевищує  $Q=0,16$ .

### Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що резонансні явища, які виникають у компенсованих асинхронних двигунах не впливають на його роботу. Резонанси напруг у процесі пуску двигунів та резонанси струмів в їх номінальних режимах роботи не призводять до збільшення струмів та напруг в його напівобмотках за рахунок низької добротності контурів КАД.

## Список літератури

1. Асинхронные двигатели серии 4А : справ. / А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М. : Энергоиздат, 1982. – 196 с.
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М. : Высш. шк., 1996. – 350 с.
3. Довідник сільського електрика / [В. В. Олійник, Л. П. Тищенко, Є. Л. Жулай та ін.] ; за ред. В. С. Олійника. – [3-є вид., перероб. і доп.]. – К. : Урожай, 1989. – 264 с.
4. Компенсовані асинхронні машини: монографія / [Мишин В.І., Каплун В.В., Чуенко Р.М. та ін.]. – К. : КНУТД, 2012. – 221 с.
5. 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.

*Рассмотрены условия возникновения резонансных режимов в компенсированных асинхронных двигателях в пусковых и номинальных режимах. Обосновано влияние резонансов напряжений и токов на работу двигателей.*

***Асинхронный двигатель, компенсация реактивной мощности, резонанс.***

*Resonance modes in compensated induction motors. The paper studies initiation conditions of resonance in compensated induction motors in starting condition and nominal rating. Influence of voltage resonance and current resonance on operation of induction motors is established.*

***Induction motor, reactive power compensation, resonance.***

УДК 631.3:621.1

## ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС ЗАНУРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТУ

***В.Є. Василенков, кандидат технічних наук  
Д.В. Субіцький, студент***

*Наведено дослідження щодо визначення теплового балансу занурювального електронасосного агрегату.*

***Температура, допустима частота включень, витрата води, занурювальний насос, об'єм башти.***

При роботі в електродвигуні мають місце втрати електроенергії, які викликають нагрівання. Підвищення температури обмотки вищедопустимої значно скорочує термін служби ізоляції.