

ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ У КОМПЕНСОВАНОМУ АСИНХРОННОМУ ДВИГУНІ

В.І. Мішин, доктор технічних наук, Р.М. Чуєнко кандидат технічних наук,

А.М. Кулинич аспірант*

Розглянуто основні фізичні процеси в компенсованому асинхронному двигуні. Наведено різні варіанти схем з'єднання обмоток статора та проведено аналіз енергетичних перетворень у двигуні.

Ключові слова: асинхронний двигун, компенсаційна обмотка, реактивна потужність, автотрансформатор.

Такі недоліки асинхронного короткозамкненого двигуна, як великий пусковий струм при малому пусковому моменті, великий струм холостого ходу, відносно низький коефіцієнт потужності [1] й інші обумовлені тим, що за принципом дії асинхронний двигун (АД) є споживачем двох видів електричної енергії—активної, перетворюваної, в механічну для приводу виконавчого механізму та у теплові втрати і реактивної, що створює змінне магнітне поле. Реактивна енергія не перетворюється в інші види, при зміні струму відбувається обмін нею між джерелом живлення і споживачем, що завантажує всі елементи електричної системи реактивним струмом. Це призводить до непродуктивних втрат електроенергії як у самому двигуні, так і в мережі та у джерелі живлення. Наявність повітряного зазору між статором і ротором значно збільшує реактивну потужність споживану асинхронним двигуном.

Спосіб компенсації реактивної потужності, заснований на включенні електричних конденсаторів паралельно споживачу або групі споживачів зменшує реактивний струм у мережі живлення, але не впливає на сам споживач, залишаючи незмінними його техніко-економічні характеристики.

Компенсований асинхронний двигун (КАД) являє собою поєднання звичайного АД із поворотним автотрансформатором (АТ) у колі статора, включеним на електричну ємність конденсаторів. Фактично КАД є споживачем

із внутрішньою ємнісною компенсацією реактивної потужності. При зміні величини ємності C , кута просторового зсуву одна відносно одної двох частин обмотки статора δ , співвідношення кількості їх та схеми включення конденсаторів КАД стає керованим за величиною споживаної реактивної потужності, може працювати з будь-яким коефіцієнтом потужності від його природного значення до одиниці і навіть у ємнісному режимі. При значному підвищенні пускового моменту (на 20-50%) він має знижене значення пускового струму, його робочий струм за номінального навантаження є меншим номінального на 10-12%, внаслідок чого втрати енергії в обмотках статора і ротора та мережі живлення зменшуються.

КАД зберігає головну перевагу асинхронного двигуна—простоту конструкції. Він виконується на базі серійного АД із незначними змінами схеми обмотки статора для включення за автотрансформаторною схемою конденсаторів внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності.

КАД відрізняється від серійного АД не лише конструктивною новизною [2,4-6], але і фізичними процесами, особливості яких розглянемо для симетричного усталеного режиму із використанням схем заміщення і векторних діаграм фази приведенного двигуна (рис.1).

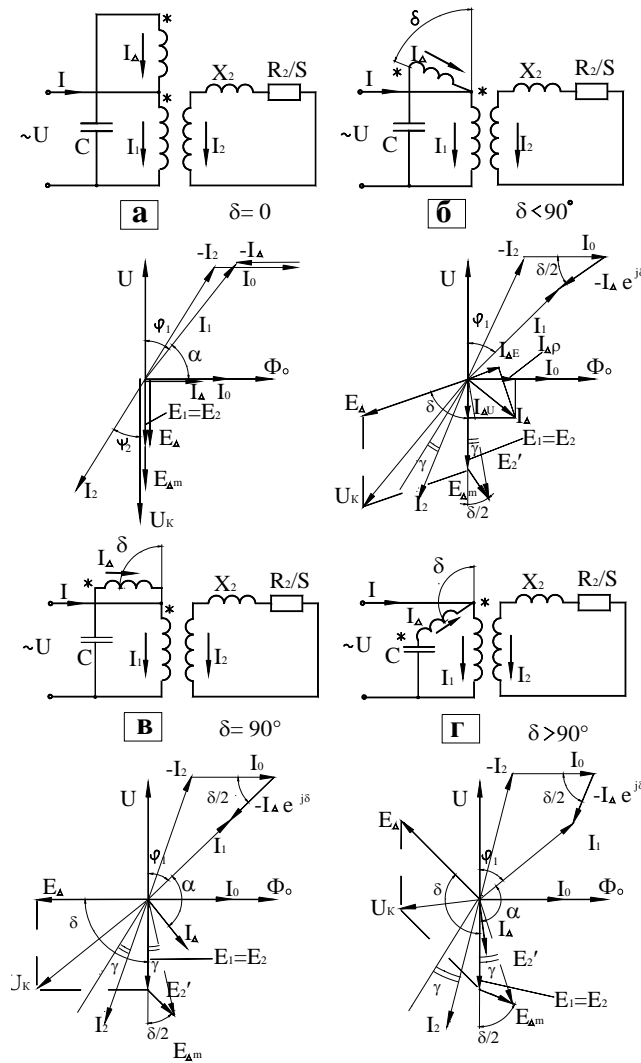


Рис. 1. Схеми заміщення фази і спрощені векторні діаграми компенсованого асинхронного двигуна при кутах просторового зміщення між основною і додатковою обмотками статора а) $\delta = 0$, б) $\delta < 90^\circ$, в) $\delta = 90^\circ$, г) $\delta > 90^\circ$

Обмотка статора КАД складається з двох частин. Основна обмотка з числом витків W як у звичайному базовому АД включається в мережу трифазної змінної напруги U . Додаткова обмотка з кількістю витків у загальному випадку $\Delta W = kW$ при $k \geq 0$ підключена до основної як вторинна обмотка поворотного АТ. Просторовий кут δ між основною і додатковою обмотками може бути будь-яким у межах $0 \leq \delta \leq 2\pi$. Навантаженням на виході АТ є конденсатори з електричною ємністю C . При цьому основний магнітний потік машини $\Phi_{_o}$ створюється струмом намагнічування основної обмотки I_0 .

При розміщенні в тих самих пазах осердя статора співвісних ($\delta=0$) обмоток W та ΔW (для спрощення аналізу і технології виконання обмоток приймаємо $k=1$, $\Delta W = W$) всі обмотки статора і ротора перетинаються єдиним потоком $\Phi_{₀}$ і в них індукуються ЕРС $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = \dot{E}_\Delta$ (див. рис.1,а).

При включенні додаткової обмотки ΔW як вторинної до основної первинної обмотки W за схемою підвищувального АТ з навантаженням на його виході у вигляді електричної ємності C напруга на конденсаторі буде дорівнювати:

$$\dot{U}_k = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 \cdot Z_1 + \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta \cdot Z_\Delta = -\dot{U} + \dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta \cdot Z_\Delta \approx \dot{E}_1 + \dot{E}_\Delta, \quad (1)$$

де $\dot{U} = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \cdot Z_1$ - напруга фази мережі, урівноважена ЕРС \dot{E}_1 та спадом напруги $\dot{I}_1 \cdot Z_1$ в основній обмотці; $Z_1 = r_1 + j \cdot X_1$, $Z_\Delta = r_\Delta + j \cdot X_\Delta$ - опори основної та додаткової обмоток, r_1 , r_Δ - їх активні складові, X_1 , X_Δ - реактивні опори розсіювання, $\dot{E}_\Delta - \dot{I}_\Delta \cdot Z_\Delta = \dot{U}_\Delta$ - напруга додаткової обмотки, \dot{E}_Δ , $\dot{I}_\Delta \cdot Z_\Delta$ - її ЕРС і спад напруги.

Нехтуючи спадом напруги в обмотках можна вважати $\dot{U}_k \approx \dot{E}_1 + \dot{E}_\Delta$. Струм вторинного кола АТ \dot{I}_Δ випереджає напругу конденсатора \dot{U}_k на $90^{\sup>0</sup>}$, збігаючись за фазою із струмом намагнічування асинхронного двигуна \dot{i}_0 . У цьому виявляється одна з особливостей фізичних процесів КАД- підмагнічувальна дія ємнісного струму \dot{I}_Δ , який заміняючи частину струму намагнічування основної обмотки зменшує його до величини $\dot{i}'_0 = \dot{i}_0 - \dot{I}_\Delta$.

При цьому умова рівноваги МРС фази двигуна представляється у вигляді $\bar{F}_1 + \bar{F}_\Delta = \bar{F}_0 - \bar{F}_2$, що за однакових схем обмоток та кількості їх витків у приведеному двигуні виразиться рівнянням струмів

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta = \dot{i}_0 - \dot{i}_2 \quad \text{або} \quad \dot{I}_1 = \dot{i}_0 - \dot{I}_\Delta - \dot{i}_2 \quad (2)$$

Струм \dot{I}_Δ обмотки ΔW за рахунок взаємоіндуктивного зв'язку (з опором X_m) із іншими обмотками створює в основних обмотках статора і ротора додаткові ЕРС $\dot{E}'_{\Delta m} = -j \dot{X}_m \dot{I}_\Delta + \dot{E}'_{\Delta m}$, які збільшують їхні ЕРС до $\dot{E}'_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}'_{\Delta m}$, $\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}'_{\Delta m}$.

Введення в коло ротора додаткової ЕРС $\dot{E}_{\Delta m}$ при постійних його параметрах R_2 , X_2 веде до росту струму i_2 та електромагнітного моменту $M = \frac{mI_2^2 R_2}{\omega_0 S}$ в процесі розгону двигуна при заданому ковзанні s . Так збільшення пускового моменту зумовлює зменшення часу розгону приводу, а в усталеному режимі при постійному моменті навантаження виводить машину на механічну характеристику з меншим ковзанням, а, отже, з меншими струмами ротора I_2 і статора I_1 порівняно з базовим двигуном.

З іншого боку збільшення ЕРС основної обмотки E_1' , що врівноважує напругу мережі, веде до зниження струму i_1 , що у відповідності із умовою рівноваги МРС (2) зменшує кут φ_1 між струмом основної обмотки I_1 та напругою мережі (див. рис. 1,а). Як наслідок зростає коефіцієнт потужності двигуна ($\cos \varphi_1$) і зменшується струм, споживаний двигуном з мережі, $i = i_1 - i_{\Delta}$.

Таким чином, співвісна з основною додаткова обмотка, включена з основною обмоткою статора за схемою підвищувального АТ, що працює на електричну ємність, є компенсаційною за реактивною потужністю. Проте, будучи чисто реактивною, компенсаційна обмотка не несе активного навантаження, але вимагає додаткового місця в пазах осердя статора, що збільшує габарити машини.

Для того, щоб додаткова обмотка стала енергонесучою і за активною потужністю її потрібно просторово змістити щодо основної на визначений кут $\delta \neq 0$. При цьому АД в колі статора об'єднується із поворотним АТ, включеним на електричну ємність (див. рис.1,б,в,г).

Так, за схемою рис.1,б при зсуві осі додаткової обмотки щодо осі основної обмотки статора на кут $\delta < 90^\circ$ в напрямку обертання поля, потік Φ_0 перетинає обмотку ΔW пізніше основної на час проходження кута δ , тобто \dot{E}_{Δ} відстає в часі від \dot{E}_1 на кут δ . Відповідно змінюється величина і фаза напруги на конденсаторі $\dot{U}_k \approx \dot{E}_1 + \dot{E}_{\Delta}$ і струму i_{Δ} (величина його залежить також від ємності

C , оскільки $I_{\Delta} = \frac{U_k}{X_c}$ при $X_c = \frac{1}{\omega_0 C}, \omega_0 = 2\pi f$). Відносно напруги фази мережі \dot{U} струм i_{Δ} має реактивну складову $i_{\Delta P}$, яка співпадає за фазою із i_0 і підмагнічує систему, та активну складову $i_{\Delta U}$, а також активну складову $i_{\Delta E}$ відносно ЕРС \dot{E}_{Δ} додаткової обмотки (див. рис. 1,б).

Величина $U \cdot I_{\Delta U} = P_{\Delta EI}$ являє собою активну потужність, споживану додатковою обмоткою з мережі електричним шляхом, а $E_{\Delta} \cdot I_{\Delta E} = P_{\Delta EM}$ є електромагнітною складовою цієї потужності.

У загальному вигляді добуток напруги на конденсаторі $\dot{U}_k = -\dot{U} + \dot{E}_{\Delta} - i_{\Delta} Z_{\Delta}$ на спряжений комплекс струму i_{Δ}^* виражає повну потужність вторинного кола АТ, що за ємнісного навантаження АТ дорівнює реактивній потужності конденсатора $\dot{U}_k i_{\Delta}^* = -jQ$, а величина $(-\dot{U} + \dot{E}_{\Delta} - i_{\Delta} Z_{\Delta}) i_{\Delta}^*$ визначає окремі складові потужності вторинного кола АТ. При цьому $-\dot{U} i_{\Delta}^* = S_{\Delta EI} = P_{\Delta EI} + jQ_{\Delta EI}$, є потужністю, яка отримується вторинним колом АТ з мережі живлення електричним шляхом, $\dot{E}_{\Delta} i_{\Delta}^* = S_{\Delta EM} = P_{\Delta EM} + jQ_{\Delta EM}$ – електромагнітна потужність; $P_{\Delta M} = -I_{\Delta}^2 r_{\Delta}$ – втрати потужності на нагрівання вторинної обмотки; $Q_{\Delta M} = -I_{\Delta}^2 X_{\Delta}$ – реактивна потужність її поля розсіювання.

Рівняння балансу реактивної потужності вторинного кола АТ представляється у вигляді $-jQ = j(Q_{\Delta EI} + Q_{\Delta EM} + Q_{\Delta MP})$, а активної за відсутності її складової в навантаженні АТ так:

$$P_{\Delta EI} + P_{\Delta EM} + P_{\Delta M} = 0 \quad (3)$$

З векторної діаграми (див. рис. 1,б) випливає, що активна потужність, отримана вторинним колом АТ з мережі живлення, дорівнює $P_{\Delta EI} = -U I_{\Delta U} > 0$, а електромагнітна $P_{\Delta EM} = -E_{\Delta} I_{\Delta E} < 0$, втрати потужності $P_{\Delta M} < 0$, тобто електрична потужність $P_{\Delta EI} > 0$ витрачається на втрати і перетворюється в електромагнітну, котра електромагнітним шляхом передається в інше коло, тобто в основну обмотку статора або ротор. Але основна обмотка статора, як і в звичайному двигуні, також одержує з мережі потужність $S_1 = \dot{U} i_1^* = P_1 + jQ_1$, активна частина

якої $P_1 = P_{1EL} = U \cdot I_{1a} > 0$ витрачається на втрати $P_{M1} = I_1^2 r_1$ і електромагнітним шляхом $P_{1EM} = E_1 I_{1a} < 0$ передається в ротор.

Позитивний характер електричних потужностей обох обмоток статора в схемі АТ свідчить про їх споживання з мережі і подальше перетворення в електромагнітні потужності за винятком втрат в обмотках. У свою чергу електромагнітні потужності відповідно до їхнього негативного знака передаються з основної і додаткової обмоток у ротор.

У такий спосіб ротор одержує активну потужність із двох сторін: з основної обмотки, як у звичайному двигуні, і з додаткової, чим зумовлюється можливість регулювання розподілу потужностей між цими обмотками та підвищення ефективності двигуна. При цьому додаткова обмотка поєднує функції компенсаційної з реактивної та енергонесучої з активної потужності.

Слід зазначити, що величина потужності і струм додаткової обмотки практично не залежать від навантаження двигуна і визначаються головним чином величиною ємності при заданому куті δ .

З векторних діаграм (див. рис. 1) випливає, що без врахування втрат на нагрівання обмоток електрична й електромагнітна потужності додаткової обмотки приблизно однакові, але протилежні за знаком, при цьому $P_{\Delta EL} \approx U^2 \omega_0 C \cos(90^\circ - \delta)$ $P_{\Delta EM} \approx U^2 \omega_0 C \cos(90^\circ + \delta)$ і мають максимальне значення при $\delta = 90^\circ$.

У реальних електричних машинах з урахуванням втрат потужності, спадів напруги в обмотках поздовжньої ємнісної компенсації у вторинній обмотці АТ при $\delta > 90^\circ$ максимум активної потужності додаткової обмотки і максимум пускового моменту двигуна зміщуються у бік $\delta > 90^\circ$. Найбільш ефективна робота КАД при $\delta = 120^\circ, 150^\circ$ (рис. 2). Проте збільшення кута δ веде до зменшення напруги U_k на виході поворотного АТ і збільшення ємності, необхідної для ефективної роботи КАД. Максимальна величина ємності вимагається при $\delta = 180^\circ$. Такий режим відповідає паралельній роботі двох

співвісних напівобмоток статора, в одну з яких включена електрична ємність подовжньої ємнісної компенсації [4].

Найбільш просто просторовий зсув основної і додаткової обмоток статора в схемі поворотного АТ досягається поділом фазної зони 60° обмотки базового АД на дві однакові за кількістю витків частини, зміщені одна відносно одної на 30° . З таких напівобмоток формуються основна і додаткова обмотки поворотного АТ із просторовим зсувом їх одна відносно одної на $30^\circ, 90^\circ$ або 150° .

При співвісних напівобмотках базового АД формуються схеми АТ з кутами між основною і додатковою обмотками $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$. Згідно з вимогами до пускових і робочих характеристик КАД приймається схема поворотного АТ обмотки статора з необхідним значенням величини кута δ .

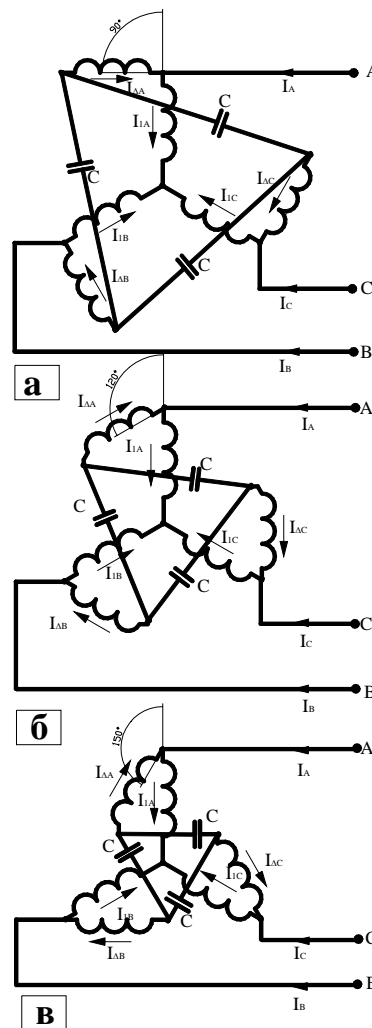


Рис. 2. Принципові електричні схеми обмотки статора КАД при а) $\delta = 90^\circ$, б) $\delta = 120^\circ$, в) $\delta = 150^\circ$

У такий спосіб рівність електричних і електромагнітних потужностей (без врахування їх втрат) у кожній з обмоток АТ, відповідність їхніх знаків (електричні потужності позитивні і споживаються з мережі, електромагнітні негативні і передаються в ротор) однакове завантаження основної і додаткової обмоток за активною потужністю чи за струмом є основними умовами ефективності енергетичних перетворень у КАД, при яких обидві обмотки статора однаковою мірою беруть участь у передачі енергії до ротора двигуна.

Такі умови забезпечуються при $\delta > 0$ і включенні конденсаторів на вихідну напругу АТ, первинним колом якого є основні фазні обмотки статора. Відхилення від цих умов, наприклад, при $\delta < 0$, призводить до передачі енергії з додаткової обмотки в основну чи навпаки з поверненням її в мережу і робить роботу КАД неефективною.

Рівняння рівноваги МРС магнітного кола КАД $\bar{F}_1 + \bar{F}_\Delta = \bar{F}_0 - \bar{F}_2$ з урахуванням просторового зсуву струмів \dot{I}_1 основної і \dot{I}_Δ додаткової обмоток статора представиться рівнянням струмів:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_\Delta e^{j\delta} = \dot{I}_0 - \dot{I}_2, \quad (4)$$

яке використовується у векторних діаграмах (див. рис. 1) для визначення струму \dot{I}_1 . Тут $\dot{I}_\Delta e^{j\delta}$ виражає струм додаткової обмотки, приведений до осі основної обмотки статора, що враховується при складанні і розрахунку математичної моделі КАД [3].

У феромагнітному колі КАД діють дві обертові хвилі МРС \bar{F}_1 основної і \bar{F}_Δ додаткової обмоток статора, що спільною дією $\bar{F}_1 + \bar{F}_\Delta$ створюють основний магнітний потік (МРС \bar{F}_0 створює потік $\bar{\Phi}_0$) і компенсують МРС ротора \bar{F}_2 . З врахуванням просторового δ і часового зміщення α (див. рис. 1в,г) струмів \dot{I}_1 і \dot{I}_Δ між собою вирази амплітуд обертових векторів їх МРС можна представити як $\bar{F}_{1m} = F_{1m} e^{j\alpha t}$ і $\bar{F}_{\Delta m} = F_{\Delta m} e^{j(\alpha t + \alpha + \delta)}$, тобто хвилі МРС просторово зміщені одна відносно

іншої на кут $\alpha + \delta$. Їхня сумарна величина буде максимальною при просторовому збігу \bar{F}_{1m} і $\bar{F}_{\Delta m}$, тобто при $\alpha + \delta = 0$ (у схемах рис. 1 прийнято $\delta > 0, \alpha < 0$). Тут $F_{1m} = \frac{m\sqrt{2} I_1 W}{\pi P} k_{01}, F_{\Delta m} = \frac{m\sqrt{2} I_{\Delta} W}{\pi P} k_{01}$ - амплітуди хвиль МРС m - фазних обмоток, а поворотні множники $e^{j\alpha t}$, і $e^{j(\alpha + \delta)t}$ вказують на їх обертовий характер.

Просторовий збіг хвиль МРС забезпечує необхідний магнітний потік при мінімальних значеннях струмів намагнічування основної і додаткової обмоток, а отже за мінімальної величини їхніх загальних струмів I_1 та I_{Δ} . Мінімум струмів намагнічування основної і додаткової обмоток статора має місце, коли їхні струми зміщені просторово і в часі на рівні й протилежні кути $\alpha = -\delta$, . Така умова приблизно задовольняється в КАД при $\delta \geq 90^\circ$ (див. рис.1 в, г), що також підвищує рівень ефективності КАД при $\delta = 120, 150$.

Поділ фазної зони 60° обмотки статора АД на дві частин по 30° в кожній та зсув основної і додаткової обмоток одна відносно іншої на $30^\circ, 90^\circ$ чи 150° за умови $\alpha = -\delta$ еквівалентно подвоєнню числа фаз $m' = 2m$ і фазних зон $2m' = 4m$ обмотки статора та зменшенню в два рази числа пазів на полюс і фазу $q' = \frac{Z}{2Pm'}$, що веде до підвищення коефіцієнта розподілу обмоток за першою гармонікою, а отже, збільшення їхньої ЕРС та зменшення струму намагнічування.

При задоволенні умови $\alpha + \delta = 0$ для основної гармоніки поля за вищими просторовими гармоніками $\nu = 2m'k \pm 1$ сума відповідних кутів буде дорівнювати $\alpha \pm \nu\delta = \pm 180^\circ$, що при $\alpha = -30^\circ, \delta = 30^\circ; \alpha = -90^\circ, \delta = 90^\circ$; чи $\alpha = -150^\circ, \delta = 150^\circ$, тобто п'ята і сьома просторові гармоніки протилежні в хвилях МРС F_1 і F_{Δ} знищуються в сумарній хвилі МРС і магнітному потоці, відповідно усувається їхня паразитна дія на момент машини. Відпадає необхідність у виконанні технологічно складних двошарових обмоток з укороченим кроком, як засобу боротьби з п'ятою і сьомою гармоніками поля. Обмотки можуть виконуватися одношаровими з повним кроком, у т.ч. "в розвалку"». Для трифазної мережі живлення ($m = 3$) дві зміщені одна відносно іншої на $\delta = 30^\circ, 90^\circ$ або кут 150°

обмотки поворотного АТ у колі статора створюють $m' = 2m = 6$ фаз або $2m' = 12$ фазних зон, а просторова крива поля крім основної містить вищі гармоніки $\nu = 2m'/k \pm 1$, спектр яких починається з 11 і 13. Такі гармоніки слабо виражені в магнітному полі, тому їхньою дією можна знехтувати.

Відомий принцип впливу на пускорегульовальні характеристики асинхронного двигуна введенням у коло ротора його додаткової ЕРС частоти обертання [1]. Таку ЕРС вводять у коло фазного ротора через колектор, електричний чи електромеханічний каскад, що значно ускладнює схему, конструкцію системи АД з перетворювачем у колі ротора.

У КАД додаткова ЕРС вводиться в коло короткозамкненого ротора через статор. Так струм I_{Δ} додаткової обмотки взаємним індуктивним зв'язком створює в основній обмотці статора і у роторі додаткову ЕРС взаємоіндукції $\dot{E}_{\Delta m} = -jX_m I_{\Delta} e^{j\delta}$, що змінює величину і фазу (на кут γ від основного напрямку) ЕРС ротора $\dot{E}'_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{\Delta m}$. Відповідно змінюється величина і фаза струму ротора I_2 , що впливає на величину моменту двигуна, а у відповідності із умовою рівноваги МРС на величину і фазу струму статора $I_1 = I_0 - I_{\Delta} e^{j\delta} - I_2$ (див. рис. 1,б,в,г).

У цілому $\dot{E}_{\Delta m}$ діє під кутом $\delta/2$ до основної ЕРС ротора, тому її вплив на збільшення пускового моменту і зниження пускових і робочих струмів є особливо значним при $\delta > 90^\circ$.

Так при $\delta = 150^\circ$ (див. рис. 2,в) пусковий момент КАД порівняно з базовим АД зростає на 20-30% без збільшення пускового струму і до 50% при невеликому його збільшенні (на 10-15%), у робочому режимі дещо підвищується швидкість ротора, знижуються струми ротора і статора, зростає $\cos \varphi$ двигуна.

У колі основної обмотки статора з фіксованою величиною напруги мережі дія додаткової ЕРС $\dot{E}_{\Delta m}$ веде до зниження пускового і робочого струму, збільшенню $\cos \varphi$ двигуна.

Дія комплексу зазначених фізичних процесів КАД відображено в його математичній моделі [3], частковим вираженням якої є система рівнянь електричної рівноваги контурів фази для сталого симетричного режиму двигуна:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= I_1(r_1 + jX_1 + jX_m) + jX_m(I_{\Delta}e^{j\delta} + I_2), \\ 0 &= I_2\left(\frac{R_2}{S} + jX_2 + jX_m\right) + jX_m(I_{\Delta}e^{j\delta} + I_1), \\ -\dot{U} &= I_{\Delta}(r_{\Delta} + jX_{\Delta} + jX_m - jX_C) + jX_m(I_1 + I_2)e^{-j\delta} \end{aligned} \quad (5)$$

Рівняння складені для системи електричних кіл з різною просторово-часовою орієнтацією струмів, що враховується при визначенні ЕРС взаємної індукції між окремими елементами кола введенням поворотного множника $e^{j\delta}$, який визначає приведення струмів просторово взаємно зміщених обмоток до осі будь-якої однієї обмотки, взятої за основну.

У рівняннях (5) взяті параметри схем заміщення базового АД залежно від схеми обмоток компенсованого двигуна.

Теоретичні дослідження, розрахунки характеристик, експериментальні випробування КАД підтверджують принципи і практичну доцільність внутрішньої ємнісної компенсації реактивної потужності в компенсованому асинхронному двигуні.

Список літератури

Вольдек А.И. Электричні машини Л.: Енергія, 1976. –782с.

Мишин В.И., Лут Н.Т. Асинхронные электродвигатели с улучшенными энергетическими и пускорегулировочными характеристиками. // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Харків;–2001.–№17. С. 110-112

Мишин В.И., Чуєнко Р.М., Кафтан Б.М. Компенсований асинхронний двигун (методика розрахунку усталеного симетричного режиму)./ Матеріали 3-ї міжнародної конференції «Системи електромеханіки й енергетики» SIELMEN–2001. Кишинів, 2001.–С. 99-106.

Патент України №30906 Н02ДО 17/34, Асинхронний двигун (Мішин В.І., Чуєнко М.О. та ін.), Бюл. №7-11, 2000.

Патент України №51814 Н02ДО 17/34, Асинхронний електродвигун (Мішин В.І., Чуєнко Р.М. та ін.), Бюл. №12, 2002.

Патент України №56330 Н02ДО 17/34, Трифазний асинхронний електродвигун (Мішин В.І., Кафтан Б.М. та інш.), Бюл. №5, 2003.

Мишин В.И., Чуенко Р.Н., Кулинич А.Н. Особенности физических процессов и энергетических преобразований в компенсированном асинхронном двигателе.

Рассмотрены основные физические процессы, протекающие в компенсированном асинхронном двигателе. Произведен анализ возможных вариантов схем соединения обмоток статора и компенсирующих емкостей.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, компенсационная обмотка, реактивная мощность, автотрансформатор.

Mishin V. Chuenko R., Kulinich A. Characteristic properties of physical processes and energy conversion in compensated induction motor.

General characteristics of physical processes in compensated induction motor. The physical processes in compensated induction motor were considered. The possible circuit solutions and energy transformations in compensated induction motor were analyzed.

Key words: induction motor, compensating winding, reactive power, autotransformer.