

Перехідні процеси в системах електропостачання

Лекція 3

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

1. Загальні відомості

Електромагнітні перехідні процеси в машинах змінного струму характеризують зміну електромагнітних параметрів робочого режиму при заданій частоті обертання. Незважаючи на обмеженість перебігу перехідного процесу в синхронній машині (0,1...0,3 с), останній суттєво впливає на визначення розрахункових параметрів машини та її конструктивних розмірів. Розрахункові характеристики в будь-який момент перехідного процесу, включаючи і початковий момент часу, можна визначити із загальних рівнянь електромагнітного перехідного процесу синхронної машини.

Аналітичне дослідження перехідного процесу в синхронній машині пов'язане з багатьма труднощами: кілька електричних контурів на роторі з різними параметрами за поздовжньою та поперечною осями, вплив магнітної асиметрії ротора тощо. Для спрощення опису та більшої наочності показники перехідного процесу у початковий момент часу визначають на основі принципу збереження первинного потокозчеплення синхронної машини.

Наявність індуктивностей в колах машини виключає раптові зміни струму, значення якого з самого початку перехідного процесу (за першим законом комутації) залишається таким же, як і в кінці попереднього режиму. При новому режимі, проте, цей струм можна розглядати з складових і періодичної, обумовленої е.р.с., яка наводиться магнітним потоком ротора, та аперіодичної, обумовленої зміною магнітного потоку статора.

Магнітний потік, зчеплений з ротором при раптовому порушенні первинного режиму, зберігається незмінним і відповідна йому наведена в статорі е.р.с. також буде незмінною. Ця умова дозволяє розглядати синхронну машину в початковий момент часу перехідного процесу як трансформатор.

З появою неусталеного режиму розрізняють:

- перехідний процес при відсутності демпферних обмоток на роторі синхронної машини;
- надперехідний процес у машинах з демпферними обмотками на роторі.

Оскільки струми в демпферних обмотках затухають значно швидше, ніж в обмотках збудження, з допустимою похибкою можна вважати, що в машинах з демпферними обмотками спочатку виникає надперехідний процес.

Нижче викладено визначення е.р.с. та індуктивних опорів синхронної машини у початковий момент часу перехідного процесу (характеристики та параметри ротора зведені до статора у відносних одиницях виміру).

2. Перехідні е.р.с. та індуктивні опори

У режимі роботи синхронного генератора без демпферних обмоток у роторі (рис. 1) на неробочому ходу повний магнітний потік обмотки збудження Φ_f складається з корисного потоку Φ_{fad} та потоку розсіювання $\Phi_{f\sigma}$. Корисний потік Φ_{fad} дорівнює у свою чергу різниці: потоку у повітряному проміжку $\Phi_{f\delta}$ та потоку поздовжньої реакції статора Φ_{fad} . При цьому результуючий магнітний потік $\Phi_{fрез}$, зчеплений з обмоткою збудження, дорівнює сумі потоків у повітряному проміжку $\Phi_{f\delta}$ та розсіювання $\Phi_{f\sigma}$.

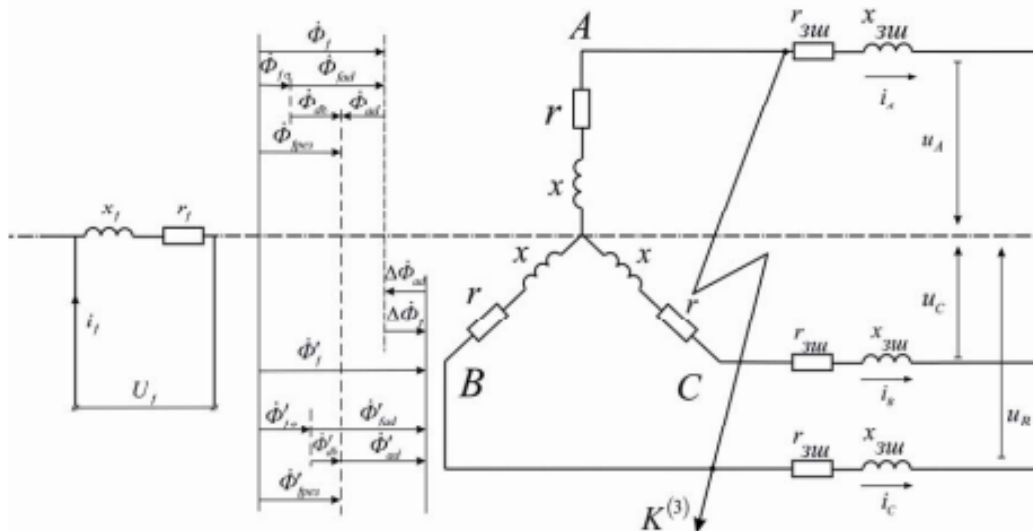


Рис. 1. Схема заміщення синхронної машини без демпферних обмоток із зображенням магнітних потоків у поздовжній осі

При раптовому КЗ на затискачах генератора магнітний потік реакції статора збільшується на $\Delta\Phi_{ad}$ через зміну струму в обмотках статора. Цей потік спрямований проти основного потоку збудження Φ_f та на його зменшення, однак баланс магнітних потоків у початковий час не змінюється, оскільки зміна потоку на $\Delta\Phi_{ad}$ викликає відповідну реакцію обмотки збудження Φ_f . Зростання потоку збудження від Φ_f до Φ'_f пропорційно збільшує потоки розсіювання від $\Phi_{f\sigma}$ до $\Phi'_{f\sigma}$, а $\Phi_{f\delta}$ відповідно зменшується в повітряному проміжку до $\Phi'_{f\delta}$.

При цьому результуючий потік $\Phi'_{fрез}$, зчеплений з обмоткою збудження, залишається незмінним і рівним $\Phi_{fрез}$. Незмінність результуючого потоку дає

змогу характеризувати машину в початковий час перехідного процесу результуючим потокозчепленням обмотки збудження.

Ураховуючи, що результуючий потік в машині створюється спільною намагнічувальною дією струму статора I_d та струму збудження I_f , результуюче потокозчеплення буде:

$$\dot{\Psi}_{fpe3} = \dot{\Psi}_f + \dot{\Psi}_{ad}. \quad (1)$$

У синхронній машині без демпферних обмоток потік збудження спрямовано лише поздовжньою віссю. Тому на неробочому ходу машини частина результуючого потокозчеплення зв'язана із статором

$$\dot{\Psi}'_d = (1 - \sigma_f) \dot{\Psi}_{fpe3}, \quad (2)$$

де σ_f – коефіцієнт розсіювання обмотки збудження (відношення потоку розсіювання $\Phi f \sigma$ до потоку збудження Φf); при переході від цих потоків до відповідних опорів

$$\sigma_f = x_{f\sigma} / x_f = x_{f\sigma} / (x_{f\sigma} + x_{ad}). \quad (3)$$

З урахуванням (3) та зміни потокозчеплень Ψ_f і Ψ_{ad} через відповідні струми та опори маємо:

$$\begin{aligned} \Psi'_d &= (1 - \sigma_f)(\Psi_f + \Psi_{ad}) = \\ &= [1 - x_{f\sigma} / (x_{f\sigma} + x_{ad})][I_f(x_{f\sigma} + x_{ad}) + I_d x_{ad}]. \end{aligned}$$

Після перетворень

$$\Psi'_d = I_f x_{ad} + I_d x_{ad}^2 / (x_{f\sigma} + x_{ad}). \quad (4)$$

Потокозчепленню Ψ'_d відповідає е.р.с.

$$E'_q = E_q - I_d x_{ad}^2 / (x_{f\sigma} + x_{ad}), \quad (5)$$

яка в початковий момент часу перехідного процесу зберігає попереднє значення.

Підставивши у вираз (5) значення синхронної е.р.с.

$$E_q = U_q + I_d x_d, \quad (6)$$

матимемо

$$E'_q = U_q + I_d [x_d - x_{ad}^2 / (x_{f\sigma} + x_{ad})] = U_q + I_d x'_d, \quad (7)$$

де

$$x'_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{f\sigma} + x_{ad}). \quad (8)$$

Е.р.с. E'_q називають поздовжньою складовою перехідної е.р.с., а опір x'_d – перехідним індуктивним опором у поздовжній осі.

З (8) витікає, що перехідний опір x'_d менший синхронного x_d :

$$x_d - x'_d = x_{ad}^2 / (x_{f\sigma} + x_{ad}).$$

У перехідному процесі е.р.с. E'_q зберігається незмінною. Її можна визначити з виразу (7), якщо врахувати значення напруги U_q та струму I_d усталеного режиму, який існував до початку перехідного процесу.

Таким чином, перехідна е.р.с. E'_q , залишаючись незмінною в початковий момент часу раптового порушення режиму, дає можливість зв'язати попередній режим з новим і в цьому – її практичне використання. Саме визначення

"перехідна" означає, що е.р.с. та перехідний опір x'_d дозволяють оцінити раптовий перехід від одного режиму до іншого. Оскільки перехідна е.р.с. раптово не змінюється, її можна віднести не лише до моменту порушення режиму, а й до будь-якого часу перебігу перехідного процесу.

Значення перехідних величин E'_q та x'_d можна також визначити із схеми заміщення машини. Схема еквівалентного контуру статора ad зі струмом dI може розглядатися як двообмотковий трансформатор. На рис. 2,а наведена принципова схема машини з магнітним зв'язком між статором та обмоткою збудження, в коло якої введено е.р.с. E_{fq} відповідно до результуючого потокозчеплення $\Psi f_{рез}$. Параметри x'_d та x_d являють собою перехідний і синхронний опори первинної обмотки, визначені при короткозамкненій та розімкненій обмотках збудження машини відповідно. Опори x'_d і x_d аналогічні індуктивним опорам трансформатора при короткому замиканні та неробочому ходу. Схему заміщення двообмоткового трансформатора зображено на рис. 2,б. Після заміни кіл з опором x_{fd} та x_{ad} одним еквівалентним колом з паралельним вмиканням цих опорів отримуємо схему заміщення машини з показниками E'_q та x'_d (рис. 2,в):

$$E'_q = E_{fq} x_{ad} / (x_{f\sigma} + x_{ad}); \quad (9)$$

$$x'_d = x_{\sigma} + x_{f\sigma} x_{ad} / (x_{f\sigma} + x_{ad}). \quad (10)$$

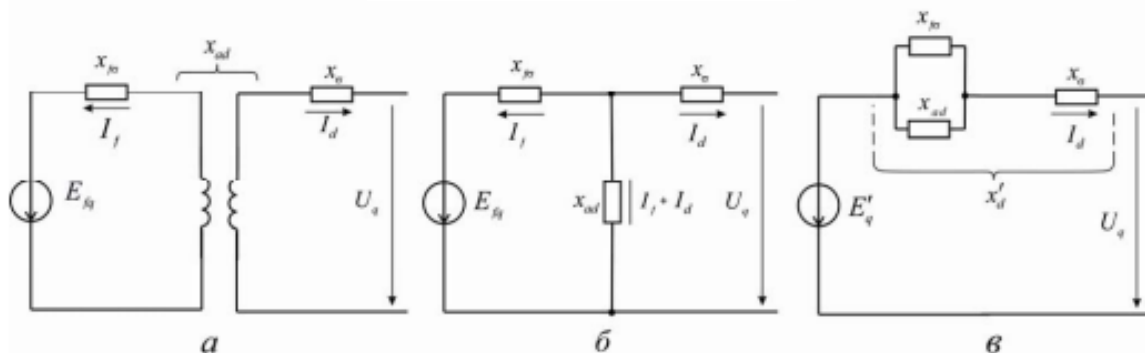


Рис. 2. До визначення перехідного індуктивного опору синхронної машини в поздовжній осі: а – принципова схема машини з магнітним зв'язком між статором та обмоткою збудження; б – схема заміщення машини як двообмотковий трансформатор; в – перетворена схема заміщення

Підставивши у вираз (8) $x_d = x_{\sigma} + x_{ad}$ констатуємо

$$x'_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{f\sigma} + x_{ad}) = x_{\sigma} + x_{f\sigma} x_{ad} / (x_{f\sigma} + x_{ad}).$$

Ураховуючи, що в поздовжній осі ротора закорочені контури (машина без демпферних обмоток) відсутні, складова перехідної е.р.с. $E'_d = 0$, а перехідні опори $x'_q = x_q$. У цьому разі періодична складова струму в початковий момент часу перехідного процесу є поздовжньою складовою і зветься початковим значенням перехідного струму

$$I'_d = E'_q / x'_d \quad (11)$$

або

$$I'_d = E'_q / (x'_d + x'_{zu}), \quad (12)$$

якщо КЗ відбувається за зовнішнім індуктивним опором x'_{zu} кола генератора.

Параметри режиму, які характеризують перехідний процес, можна зобразити на векторній діаграмі. На рис. 3,а видно, як визначається перехідна е.р.с. E_q на основі даних початкового усталеного режиму. Для цього від кінця вектора напруги U_q (точка A) прокладають вектори спаду напруги $jI_d x'_d$ та $jI_q x'_q$ і отримують точку B . Опускаючи перпендикуляр з точки B до поздовжньої осі, отримують точку C . Відрізок OC на цій осі відповідає E_q , що випливає з рівняння (7). Трикутник BCD – прямокутник, при цьому точка C міститься на колі з діаметром

$$BD = I(x'_q - x'_d). \quad (13)$$

При раптовому КЗ на затискачах генератора струм збільшується від I до I' , напруга дорівнює U , а кут між ними – φ' . Перехідна е.р.с. залишається незмінною. За цих умов векторну діаграму, що характеризує перехідний процес (рис. 3,б), можна побудувати за відомими відрізками $A'B'$ та $B'D'$, пропорційними струму, а також відомим кутом $90^\circ - \varphi'$. Відрізок $B'D'$ – діаметр кола, на якому кінець вектора E_q . Для визначення початку координат діаграми O' від точки D' проводиться пряма до перетину з лінією, яка за напрямком збігається з U . Відрізок $O'C'$ розташований між початком координат та півколом, являє собою E_q . Початок координат O' можна визначити також з допомогою дуги, описаної з точки D' .

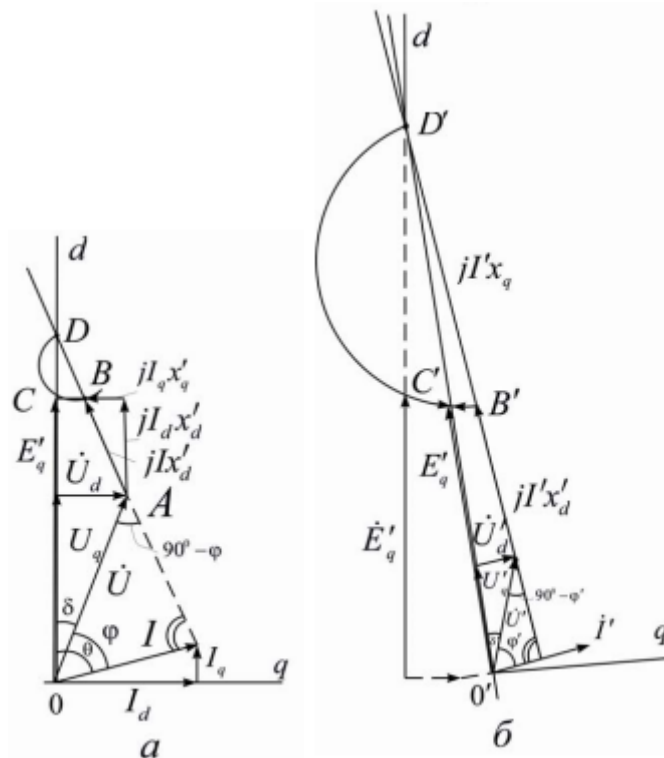


Рис. 3. Векторні діаграми визначення е.р.с. синхронної машини початкового усталеного (а) та перехідного (б) режимів

У синхронній машині без демпферних обмоток перехідний процес виникає звичайно в перший момент часу після раптової зміни навантаження. Потім змінювання струмів та напруг стає згасаючим в цьому режимі до усталених значень. Однак, на практиці трапляються багато випадків, коли режим синхронної машини можна приблизно вважати перехідним за весь час її експлуатації. Серед таких режимів – робота синхронних генераторів, від яких живляться електродугові печі в металургії з різкими коливаннями навантаження протягом періоду плавки металу, багатомашинні агрегати з раптовими змінами навантаження та ін. За таких експлуатаційних режимів період часу зміни навантаження менший постійної часу затухання аперіодичних складових струму в обмотці ротора

$$\bar{T}_d = \bar{T}_d x_d' / x_d, \quad (14)$$

де T_d – постійна часу обмотки збудження при розімкненій обмотці статора.

3. Надперехідні е.р.с. та індуктивні опори

У синхронній машині з демпферними обмотками значення е.р.с. та індуктивного опору в початковий момент часу перехідного процесу залежать також від струмів у цих обмотках. Синхронна машина має на роторі, окрім обмотки збудження, по одній демпферній обмотці в його поздовжній та поперечній осях. Обмотка статора та обидві обмотки ротора в поздовжній осі зв'язані між собою загальним потоком взаємоіндукції Φ_{ad} , якому відповідає реактивний опір поздовжньої реакції x_{ad} .

Раптове прирощення потоку $\Delta\Phi_{ad}$ в такій машині викликає внаслідок реакції ротора прирощення потоку збудження $\Delta\Phi_f$ та $\Delta\Phi_{1d}$. До того ж баланс результуючих поточозчеплень повинен зберігатися незмінним і відповідати рівнянням:

для обмотки збудження

$$\Delta\bar{I}_f(x_{f\sigma} + x_{ad}) + \Delta\bar{I}_{1d}x_{ad} + \Delta\bar{I}_{1d}x_{ad} = 0; \quad (15)$$

для поздовжньої демпферної обмотки

$$\Delta\bar{I}_{1d}(x_{1d\sigma} + x_{ad}) + \Delta\bar{I}_{1d}x_{ad} + \Delta\bar{I}_d x_{ad} = 0, \quad (16)$$

де ΔI_{1d} та $x_{1d\sigma}$ – початкове значення струму, наведеного в поздовжній демпферній обмотці, та її реактивний опір.

З виразів (15) і (16) як наслідок рівність поточозчеплень розсіювання обмотки збудження та поздовжньої демпферної обмотки:

$$\Delta\bar{I}_f x_{f\sigma} = \Delta\bar{I}_{1d} x_{1d\sigma}. \quad (17)$$

Чим менший опір розсіювання обмотки, тим більший наведений в ній струм і відповідно більша роль цієї обмотки у створенні відповідної реакції ротора.

Якщо спільну реакцію обмотки збудження та демпферної поздовжньої обмотки (кількох демпферних обмоток) у початковий момент часу перехідного процесу замінити такою ж реакцією від сумарного струму

$$\Delta \tilde{I}_{de} = \Delta \tilde{I}_f + \Delta \tilde{I}_{ld}$$

в одній еквівалентній обмотці поздовжньої осі ротора з реактивним опором розсіювання $x_{\sigma de}$, то рівняння балансу потокозчеплення можна подати у такому вигляді:

$$\Delta \tilde{I}(x_{\sigma de} + x_{ad}) = (\Delta \tilde{I}_f + \Delta \tilde{I}_{ld})(x_{\sigma de} + x_{ad}) = -I_d x_{ad}. \quad (18)$$

Сумісний розв'язок рівнянь (15), (17) та (18) дає змогу визначити еквівалентне реактивне розсіювання

$$x_{\sigma de} = x_{f\sigma} x_{ld\sigma} / (x_{f\sigma} + x_{ld\sigma}) \quad (19)$$

як опір двох паралельних віток з $x_{f\sigma}$ та $x_{ld\sigma}$. При цьому реактивний опір машини в поздовжній осі ротора та її аналог з машиною без демпферних обмоток

$$x''_d = x_d - x_{ad}^2 / (x_{\sigma de} + x_{ad}) = x_\sigma + x_{\sigma de} x_{ad} / (x_{\sigma de} + x_{ad}). \quad (20)$$

Загалом під еквівалентним опором кількох демпферних контурів поздовжньою віссю $x_{\sigma de}$ розуміють сумарний опір паралельних віток цих контурів та обмотки збудження.

Опір x''_d зветься надперехідним реактивним опором в поздовжній осі синхронної машини. У поперечній же осі ротора, де розташована лише одна демпферна обмотка, її індуктивний опір зветься надперехідним реактивним опором в поперечній осі

$$x''_q = x_q - x_{aq}^2 / (x_{lq\sigma} + x_{aq}) = x_\sigma + x_{lq\sigma} x_{aq} / (x_{lq\sigma} + x_{aq}). \quad (21)$$

При наявності в поздовжній осі ротора кількох демпферних обмоток в (21) необхідно замість $x_{lq\sigma}$ підставити еквівалентний опір цих обмоток $x_{\sigma de}$.

Електрорушійні сили E''_q та E''_d у початковий момент часу перехідного процесу зветься відповідно поздовжньою та поперечною складовими надперехідної е.р.с. Ці е.р.с. на початку зміни режиму зберігають свої значення і визначаються:

$$E''_q = U_q + I_d x''_d; \quad (22)$$

$$E''_d = U_d + I_q x''_q, \quad (23)$$

де U_d , U_q , I_d , I_q – складові напруг та струмів до порушення нормального режиму роботи синхронної машини.

Таким чином, синхронну машину з демпферними обмотками в початковий момент часу перехідного процесу характеризують складові надперехідної е.р.с. E''_d , E''_q та надперехідні опори x''_d , x''_q . Приставкою "над" у назві "надперехідні" підкреслюють вплив на перехідний процес демпферних обмоток машини.

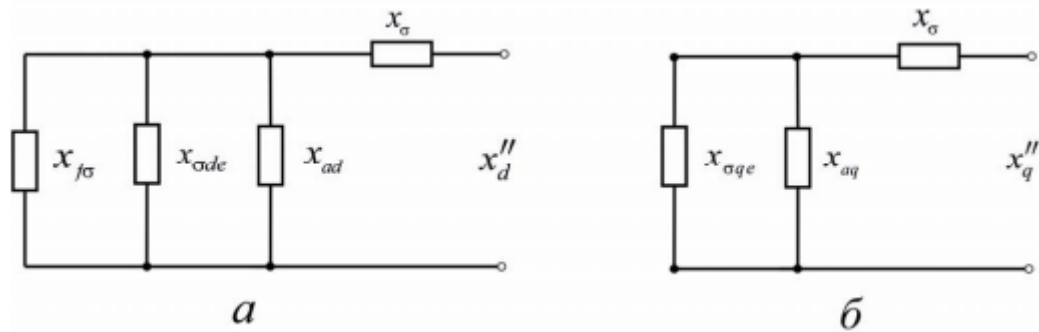


Рис. 5. Схеми заміщення для визначення опорів у поздовжній (а) та поперечній (б) осях

Опори x''_d та x''_q звично визначати зі схем заміщення машини (рис. 5). Опори $(x_f - x_{fde})$ і $(x_{de} - x_{fde})$ є опорами розсіювання обмоток у поздовжній осі ротора (рис. 5,а). Оскільки опір $(x_{fde} - x_{ad})$ малий, його не враховують і користуються спрощеною системою заміщення (рис. 5,а), де $x_{fs} = x_f - x_{ad}$ та $x_{\sigma de} \approx x_{de} - x_{ad}$ являють собою опори розсіювання обмоток ротора, $x_{\sigma} = x_d - x_{ad}$ – статора. Схема заміщення опору x''_q в поперечній осі на рис. 5,б, де $x_{\sigma de} = x_{de} - x_{aq}$ становить еквівалентний опір розсіювання поперечного демпферного контуру.

Складові надперехідної е.р.с. E''_d та E''_q можна визначити з векторної діаграми до усталеного режиму (рис. 6,а). Під час надперехідного процесу вони зберігаються постійними. Від початку координат на діаграмі відкладають вектори напруги U та струму I з кутом φ між ними. Від кінця вектора напруги U (точка A) відкладають вектори спаду напруги jIx''_d та jIx''_q (точки B і D). З точки B опускають перпендикуляр до поперечної осі. Отриманий відрізок OC дорівнює складовій е.р.с. E''_q . Перпендикуляр з точки D на відрізок BC відсікає в точці E відрізок, який дорівнює складовій е.р.с. E''_d . Вектор OE дорівнює надперехідній е.р.с. E'' .

Надперехідний процес після раптової зміни навантаження досліджується за допомогою векторної діаграми аналогічно тому, як на діаграмі рис. 3,б для перехідного процесу, однак (як правило) $x''_q = x''_d$. При цьому напівколо DB настільки мале, що точки D, B, E практично збігаються.

Визнаючи відрізок OE рівним E'' , можна побудувати спрощену векторну діаграму (рис. 6,б), придатну для практичних розрахунків надперехідного процесу.

При суто індуктивному опорі кола статора поздовжня та поперечна складові надперехідного струму (початковий момент часу перехідного процесу) визначаються виразами:

$$I''_d = E''_q / (x''_d + x_{zu}); \quad (24)$$

$$I''_q = E''_d / (x''_q + x_{zu}). \quad (25)$$

Повний надперехідний струм

$$I'' = \sqrt{(I''_d)^2 + (I''_q)^2}. \quad (26)$$

Кут між надперехідними величинами E'' та I'' в загальних випадках не дорівнює 90° , оскільки навіть з суто індуктивним опором кола $x''_q \neq x''_d$.

4. Електрорушійна сила та індуктивні опори двигунів

Перехідний процес в двигунах проходить так само, як і в синхронних генераторах. У початковий момент часу при КЗ суттєвий вплив на хід процесу мають лише потужні двигуни. Двигуни ж невеликої потужності та інші електроприймачі (освітлювальне навантаження, нагрівальні установки) називають узагальненим навантаженням, яке враховують у вигляді типового складу споживачів промислового району з існуючою схемою електропостачання, увімкненою до великих вузлів СЕП.

На відміну від синхронних генераторів в асинхронних двигунів у початковий момент часу перехідного процесу – інші значення надперехідних е.р.с. та індуктивних опорів. У перезбуджених синхронних двигунах та компенсаторах надперехідна е.р.с. звичайно вища підведеної напруги. Тому при будь-якому різкому її зниженні реактивний струм, генерований двигуном, зростає. У недозбуджених синхронних двигунах надперехідна е.р.с. нижча підведеної напруги, в результаті чого реактивний струм споживається з мережі. За умови рівності е.р.с. та напруги двигуна ($E''_q = U$), реактивний струм у початковий момент часу перехідного процесу відсутній.

Асинхронні двигуни в початковий момент часу перехідного процесу можна розглядати як недозбуджені синхронні двигуни; в нормальному режимі асинхронні двигуни працюють з невеликим ковзанням (2...5 %).

Для асинхронного двигуна, як і для синхронного, надперехідні е.р.с. та індуктивні опори в початковий момент часу раптового порушення режиму можна визначити, базуючись на незмінності потокозчеплення з обмотками ротора. З огляду на повну симетрію ротора, однак, для асинхронних двигунів немає необхідності розглядати е.р.с. та реактивні опори в поздовжній та поперечній осях. Надперехідний реактивний опір двигуна знаходять за допомогою схеми заміщення, аналогічної рис. 5,а. Цей опір являє собою індуктивний опір короткого замикання у загальмованому двигуні ($s = 100\%$). Практично відносне значення надперехідного опору асинхронного двигуна визначають за його пусковим струмом $I_{\text{пуск}}$:

$$x''_{\text{АД}} = U_n^2 \cos \varphi_n \eta / (I_{\text{пуск}} P_n). \quad (27)$$

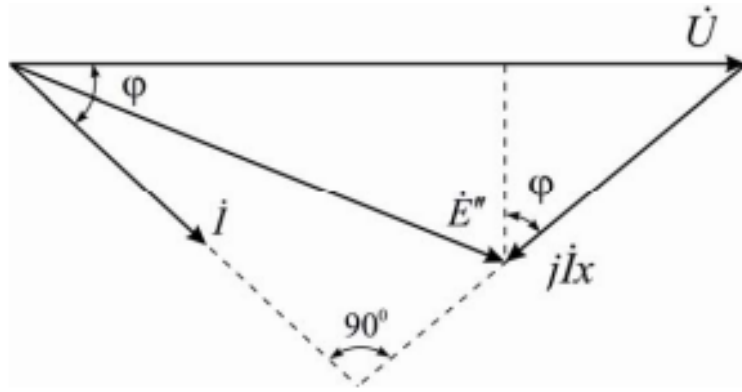


Рис. 8. Векторна діаграма асинхронного двигуна

Надперехідна е.р.с. асинхронного двигуна встановлюється з векторної діаграми, побудованої для попереднього режиму (рис. 8):

$$E''_{\phi} = \sqrt{(U_{\phi 0} - I_0 x''_{AD} \sin \varphi_0)^2 + (I_0 x''_{AD} \cos \varphi_0)^2}, \quad (28)$$

де $U_{\phi 0}$, I_0 , φ_0 – попередні значення напруги, струму та кута зсуву між ними.

Розглядаючи е.р.с. E''_{ϕ} як проекцію вектора цієї е.р.с. на вектор U , приблизно матимемо

$$E''_{\phi} \approx U_{\phi 0} - I_0 x''_{AD} \sin \varphi_0. \quad (29)$$

Вплив узагальненого навантаження в початковий момент часу перехідного процесу залежить від залишкової напруги в місці її ввімкнення та віддаленості від точки КЗ. При $E''_n > U$ навантаження – додаткове джерело живлення місця КЗ. Чим ближче навантаження розміщується до точки КЗ, тим більший його вплив на живлення місця пошкодження. Тому в практичних розрахунках надперехідного струму в точці КЗ та найближчих до неї колах ураховують лише ті навантаження та окремі двигуни, які безпосередньо зв'язані з точкою КЗ або розміщені на невеликій відстані від місця пошкодження.