

УДК 621.313.33

О.Б. Єгоров, О.Ю. Єгорова

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВПЛИВІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Проблема стійкості багатомашинних електротехнічних систем продовжує залишатися актуальною для великих промислових підприємств з безперервним технологічним процесом. Велике число таких підприємств зосереджене в нафтовій і газовій галузях промисловості, особливо в їх переробних і транспортних структурах. Досвід експлуатації, дослідження показують, що стійкість електротехнічних систем може порушуватися як при зовнішніх (провалах напруги), так і при внутрішніх (короткі замикання) збуреннях. Запропоновано програмне забезпечення розрахунку стійкості асинхронних двигунів із урахуванням потужності компенсуючих пристроїв.

Ключові слова: енергозбереження, асинхронний двигун, реактивна потужність, регулювання електроенергії.

Вступ

Останніми роками в Україні та за кордоном багато уваги приділяється аналізу і розробці методів дослідження перехідних процесів в системі електропостачання. Це пов'язано із збільшенням потужностей вузлових пунктів навантажень та системи електропостачання в цілому. Основну частину навантаження складають асинхронні двигуни, властивості яких істотно виявляються в характері перехідних процесів всього вузла системи. Перехідні процеси в таких системах пов'язані як з нормальною роботою споживачів за умовами пускових режимів, так і з різноманітними аварійними ситуаціями, викликаними відключеннями окремих елементів або короткими замиканнями. Навіть короткочасні перерви в нормальному електропостачанні асинхронних двигунів можуть привести до тривалих порушень технологічних процесів. Перехідні процеси в елементах СЕП розглядаються не тільки з погляду забезпечення їх надійності, але і з погляду забезпечення надійності всієї системи електропостачання. Аварії, пов'язані з порушеннями стійкості паралельної роботи в крупних електричних системах, спричиняють розлад електропостачання великих районів і міст. Тяжкі наслідки таких аварій примушують приділяти значну увагу питанням збільшення стійкості як при проектуванні електричних станцій і мереж, так і в експлуатації. Проблема стійкості наклала глибокий відбиток на схеми комутації, режими роботи і параметри устаткування електричних систем.

Тема є актуальною. Асинхронне навантаження займає майже 90% від усього навантаження промислових підприємств, транспорту та інших галузей народного господарства, які є основними споживачами електроенергії. Порушення якості електроенергії, що живить асинхронні вузли навантаження зазвичай призводить до економічних збитків. Також актуальні питання стійкості для безпеки на виробництві.

Мета наукової роботи: визначити вплив рівня компенсації реактивної потужності на критичну напругу асинхронних двигунів. Для досягнення цієї мети необхідно розглянути питання стійкості асинх-

ронного навантаження і її залежність від ступеня компенсації реактивної потужності системи.

Результати досліджень

Стійкості асинхронних вузлів навантаження присвячено багато робіт в науковій літературі. Зокрема проф. М.С. Єршов і доц. О.В. Єгоров [1] підводять основні підсумки досліджень стійкості електротехнічних систем з асинхронними приводами.

Проблема стійкості багатомашинних електротехнічних систем (ЕТС) продовжує залишатися актуальною для великих промислових підприємств з безперервним технологічним процесом. Велике число таких підприємств зосереджене в нафтовій і газовій галузях промисловості, особливо в їх переробних і транспортних структурах. Досвід експлуатації, дослідження показують, що стійкість електротехнічних систем може порушуватися як при зовнішніх (провалах напруги), так і при внутрішніх (короткі замикання) збуреннях. Захаровим П.А. і Захаровим А.М. [2] розглядається розробка математичного опису електромагнітних і електромеханічних процесів в асинхронному електроприводі, що є актуальним при дослідженні даної теми.

Область застосування регульованих електроприводів змінного струму в значній мірі розширюється. Особливо це відноситься до асинхронних електроприводів зі статичними перетворювачами енергії і двигунами з короткозамкненим ротором. Ця тенденція обумовлена більшою мірою конструктивною простотою і надійністю такого типу двигунів, а також технологічністю їх виготовлення, порівняно низькою вартістю і зручністю в експлуатації. Проте двигун, як об'єкт автоматичного управління є складною динамічною структурою, що описується системою нелінійних диференціальних рівнянь високого порядку. З цієї причини застосування такого опису в розробках систем управління асинхронним електроприводом в більшості випадків опиняється проблематичним. Найчастіше в завданнях управління користуються спрощеними варіантами динамічних моделей, що приводить до погіршення якості процесів регулювання координат асинхронного електроприводу.

Неодноразово ставилося питання про розробку динамічних моделей асинхронного двигуна. Проте існуючі моделі у ряді випадків дають істотні помилки. В той же час в зв'язку розширенням області застосування, особливо високочотних електроприводів потрібні уточнені моделі.

У роботі авторів Таранова Д.М. і Лебедева К.Н. [3] розглядається проблема дослідження динамічної стійкості асинхронних електродвигунів.

При використанні асинхронних електродвигунів питання динамічної стійкості системи набуває особливо важливе значення, оскільки інертні маси частин, що обертаються, малі і не виправляють характеристики при сумісній дії перевантаження і зниженні напруги. Перевірку на динамічну стійкість можна провести або аналітичним, або графоаналітичним методом. Розглядається графоаналітичний метод. При використанні відомого методу погрішність обчислень може досягати 10%. Тому механічну характеристику електродвигуна пропонується апроксимувати не однією, а декількома прямими лініями. При цьому допустимий час перевантаження може бути розраховане як сума часів перевантаження, що становлять, на всіх ділянках. Доведено, що найбільш раціональною є апроксимація 3 прямими лініями, а погрішність обчислень не перевищить 1%. Приведені робочі формули для визначення допустимого часу перевантаження і коефіцієнта перевантаження електродвигуна по моменту. Для перевірки справедливості приведених формул проведено машинне моделювання перевантажувального режиму, в ході якого здійснювалося вирішення системи диференціальних рівнянь чисельним методом Рунге-Кутта-Мерсона. Початковими даними були номінальні параметри електроприводу, параметри Т-подібної 5-елементної схеми заміщення обмоток, механічна характеристика робочої машини і сумарний момент інерції системи. Результати моделювання співпали з теоретичними даними з довірчою вірогідністю 98%, що дозволило рекомендувати приведені формули для практичних розрахунків. Бесараб А.Н. і Невольніченко В.Н. [4] проаналізували електромагнітні і електромеханічні перехідні процеси в системі електропостачання.

Розроблена спрощена модель розрахунку електромагнітних перехідних процесів досліджуваних двигунів і електромеханічних перехідних процесів в багатомашинній системі з розімкненою мережею довільної конфігурації. Досліджувані електричні двигуни моделюються по повних рівняннях, а електрична мережа - рівняннями сталого режиму.

При необхідності докладного аналізу перехідних процесів в багатомашинних системах електропостачання промислових підприємств і точного визначення піків струмів і електромагнітних моментів, двигуни необхідно моделювати з використанням їх "повних" систем диференціальних рівнянь, а рівняння рівноваги напруги для елементів електричної мережі записувати в диференціальній формі. Рішення вказа-

ної задачі можливе двома способами. Перший з них полягає у використанні диференціальних рівнянь для всіх елементів. Напруги у вузлах схеми розраховуються з рівнянь, отриманих на основі першого закону Кірхгофа для похідних струмів. Другий спосіб відрізняється використанням чисельного диференціювання струмів при визначенні напруги у вузлах системи електропостачання.

Застосування повної моделі зв'язане із значними труднощами, перш за все із-за високого порядку диференціальних рівнянь і наявності параметрів, що періодично змінюються. Крім того, розрахунок миттєвих значень режимних параметрів необхідний тільки для двигунів особливо відповідальних механізмів, як правило, синхронних, в решті випадків досить аналізувати тільки електромеханічний перехідний процес. Це обумовлює широке застосування спрощених моделей, в яких часто не враховуються швидкопротекаючі електромагнітні процеси. Добре відомі роботи в цьому напрямі Донецького, Київського, інституту електродинаміки АН України, Московського енергетичного інституту.

При необхідності розрахунку миттєвих значень струмів і електромагнітних моментів досліджуваних двигунів в багатомашинній системі можна скористатися моделлю, яка дозволяє моделювати систему електропостачання в повному об'ємі без застосування грубого еквівалентування, базуючись на принципах системного підходу. Вона є взаємозв'язаною сукупністю наступних моделей:

- 1) розрахунку електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів СД по повних рівняннях Парка-Горева з урахуванням витіснення струму в роторі;
- 2) розрахунку електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів АД по повних рівняннях;
- 3) розрахунку сталого режиму електричної мережі.

У роботі професора Паулі В.К. і інженера Воронікова Р.А. [5,6] розглядається проблема компенсації реактивної потужності як раціонального використання електроенергії. Найбільш доцільна система розподіленої компенсації реактивної потужності в точках перетворення енергії, включаючи об'єкти споживання електроенергії. Компенсація реактивної потужності – один з найбільш ефективних засобів раціонального використання електроенергії.

У більшості практичних випадків є видимою технічна і економічна доцільність повної або близької до неї компенсації реактивної потужності з регулюванням по основному параметру – реактивній потужності. Таке регулювання, як правило, співпадає з регулюванням по напрузі. Можливі джерела компенсації реактивної потужності: синхронні компенсатори; синхронні двигуни, що працюють в режимі перезбудження; косинусні конденсатори (конденсаторні установки); статичні компенсатори тиристорів і ін.

Найбільш оптимальне рішення – компенсація реактивної потужності споживачами. Зменшення

втрат активної електроенергії, обумовлених перетіканнями реактивних потужностей, є реальною експлуатаційною технологією енергозбереження в електричних мережах і технологією підвищення ефективності використання електроенергії (потужності) у споживачів. Економічні інтереси як підприємств мережі, так і підприємств-споживачів в даний час вимагають особливої уваги до компенсації реактивної потужності за допомогою компенсуючих пристроїв. Це і надійність електропостачання споживачів, і надійність електричних мереж і енергосистем. Компенсація реактивної потужності – один з найбільш доступних, ефективних і простих способів енергозбереження, як для споживача, так і для компанії електромережі, а також зниження собівартості продукції, що випускається споживачами. Це, загалом і в цілому, і розумілося і забезпечувалося, в першу чергу завдяки діючим нормативам. Проте початок переходу електроенергетики України на шлях конкурентних ринкових відносин спричинив зміну нормативної бази у сфері енергетики. В деяких випадках це опинилося не зовсім виправдано. Споживачі електричної енергії перестали брати участь в підтримці коефіцієнта потужності і компенсації реактивної потужності на шинах навантажень (з балансу ЕЕС України випало понад 20 тис. Мвар пристроїв компенсації реактивної потужності споживачів). Поквапилися і відмінили важливу функцію споживачів електричної енергії в забезпеченні стійкості роботи енергосистем за рахунок підтримки напруги у вузлах і на шинах навантажень і компенсації реактивної потужності далеко до введення заміщаючого механізму – ринкового. У [7] запропонований новий практичний критерій для розрахунку статичної стійкості вузлів навантаження електричних систем. Показані його фізична суть, обґрунтування і спосіб використання. Для джерела, що живить вузол навантаження по радіальній електромережі, приведена методика визначення характеристик активної і реактивної потужностей по напрузі.

1. Живлення асинхронно двигунового навантаження від потужної енергосистеми

В цьому випадку передбачається, що ЕЕС володіє нескінченною потужністю, має вузлову точку незмінної напруги або точку, що живиться від еквівалентного джерела з незмінною Е.Р.С. Навантаження представлено у вигляді еквівалентного асинхронного двигуна [8, 9]. Виконаємо аналіз статичної стійкості асинхронного навантаження для даного випадку при змінній і постійній споживаній активній потужності. При зміні активної потужності, споживаним навантаженням, стан рівноваги сталого режиму описується так

$$P - P_{MX} = 0, \tag{1}$$

$$\frac{U_c r_s}{(r^2 + (x_{\text{ЭК}} + x_s)^2 s^2) - \omega M_{MX}} = 0, \tag{2}$$

де перший доданок — споживана асинхронним двигуном активна потужність, а другий доданок визначається моментом опору робочого механізму.

Рівняння (2) містить тільки одну істотну змінну – ковзання s , а інші параметри і показники в сталому режимі постійні. Дія збурень впливає тільки на баланс активної потужності в точці включення навантаження, порушення якого можна оцінити за критерієм

$$\frac{d(P_{MX} - P)}{ds} < 0, \tag{3}$$

звідки при $P_{MX}(s) = \text{const}$ отримуємо

$$\frac{dP}{ds} > 0. \tag{4}$$

При позитивному значенні критерію (4) робота асинхронного навантаження стійка. Межа збереження стійкості має місце при $dP/ds = 0$ (рис. 1).

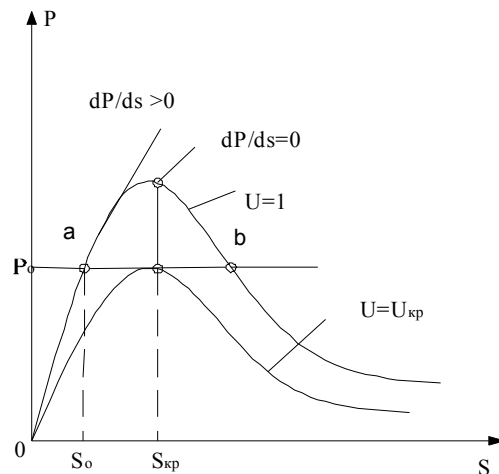


Рис. 1. Характеристики еквівалентного асинхронного двигуна

Фізично похідна dP/ds характеризує реакцію СЕП на збільшення ковзання s асинхронного навантаження. При позитивному знаку похідної випадковому підвищенню ковзання відповідає електромагнітна потужність, яка відбирається з електричної мережі і яка зростає швидше, ніж гальмуюча статична потужність робочого механізму. Надлишок потужності при цьому приводить до прискорення двигунів, внаслідок чого робоча точка режиму повертається до ковзання, яке відповідає початковому стану.

З рівняння сталої рівноваги (2) і обважнює режим по змінній s можна визначити по критерію (4) критичні значення параметрів $P s$, що змінюються, для граничного по стійкості стану (див. рис. 1). При $dP/ds = 0$ маємо:

$$s_K = r_2 / (x_s + x_{\text{ЭК}}). \tag{5}$$

Найбільше значення активної потужності, споживаним навантаженням, визначається:

$$P_{\text{max}} = U_c^2 / (2(x_s + x_{\text{ЭК}})), \tag{6}$$

яке відповідає перекидаючому моменту еквівалентного асинхронного двигуна.

Оскільки перекидаючий момент пропорційний квадрату напруги на затисках двигуна, із зниженням напруги він зменшується. Напруга, при якій переки-

даючий момент стає рівним навантаженню двигуна, називається критичним (рис. 1.) та визначається як

$$U_{C,кp} = \sqrt{2mP_{НОМ} (x_{ЭК} + x_S)}, \quad (7)$$

де $P_{НОМ}$ — номінальна потужність еквівалентного двигуна; m — коефіцієнт його завантаження.

При напрузі, меншій, ніж критичне, двигуни вузла навантаження загальмовуються. Значення критичної напруги сумісне з $s_{кp}$ і $P_{кp}$ для граничного режиму характеризує ступінь стійкості асинхронного навантаження, причому, чим вище критична напруга, тим нижче стійкість двигунів.

Згідно (7) запас стійкості залежить від завантаження двигунів m , їх електричній віддаленості $x_{ВН}$ від шин незмінної напруги і компенсації реактивної потужності в точці включення навантаження. Еквівалентний опір $x_{ЭК}$ визначається умовами зв'язку даної точки системи з шинами незмінної напруги; $x_{ЭК} = x_{ВН}$ при $x_{ВН} \leq (0,1 \div 0,15)x_S$.

При постійній споживаній активності потужності ($P = \text{const}$) надмірна енергія електричної системи може бути оцінена, по балансу реактивної потужності:

$$Q = Q_{\mu} + Q_S, \quad (8)$$

де $Q_{\mu} = U_c^2 / x_{\mu}$ при $\alpha=0$;

$$Q_S = U_c^2 (x_{ЭК} + x_S) / [(x_{ЭК} + x_S)^2 + r_2^2 / s^2]. \quad (9)$$

Критичні параметри системи визначаються на основі аналізу (8), який виконують в такій послідовності: задаються ковзаннями s і знаходять значення струму, відповідне незмінному навантаженню $P = \text{const}$:

$$P = I^2 (r_2 / s); \quad (10)$$

по набутих значень струму обчислюють ряд напруги

$$U_C = I \sqrt{(x_{ЭК} + x_S)^2 + (r_2 / s)^2}; \quad (11)$$

далі визначають складові (8).

Графічний аналіз залежності $Q(U_C)$ по складовим Q_{μ} і Q_S (рис. 2) показує, що граничний режим з критичними значеннями параметрів $U_{c,кp}$, $Q_{кp}$ відповідає критерію $dQ/dU_C = -\infty$.

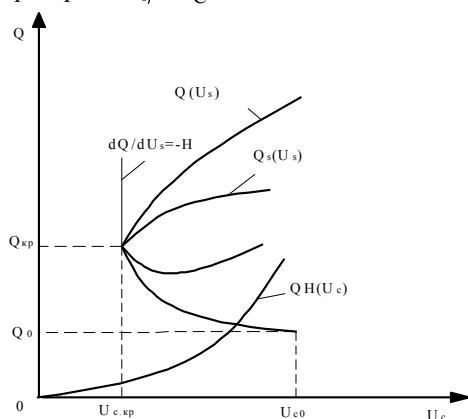


Рис. 2. Залежності реактивної потужності від напруги, що незалежно змінюється, в системі

2. Розробка і впровадження програмного забезпечення оцінки впливу компенсації реактивної потужності на стійкість асинхронних двигунів

Умови для розробки програми впливу компенсації реактивної потужності на стійкість асинхронних вузлів навантаження: встановити зміну умов статичної стійкості по напрузі вузла навантаження з дев'ятьма асинхронними двигунами при включенні конденсаторної батареї, яка має в початковому режимі потужність $Q_{*к.б.}$, МВт.

За допомогою Object Pascal — програми можна робити розрахунки при будь-яких початкових умовах. Дана програма була застосована при розрахунках електричної системи напругою 6 кВ з АД потужністю $P_{ад,ном} = 9 \cdot 630 = 5,67$ МВт, потужністю конденсаторних батарей 0,263 МВар, $\cos\phi = 0,89$; $m = 0,87$; $m_{max} = 2,1$; $\eta = 0,935$ та параметри зовнішньої мережі $Z_{*ВН} = 0,1983 + j0,1919$.

Були проведені розрахунки стійкості двигунів вручну та за допомогою створеної програми (рис. 3).

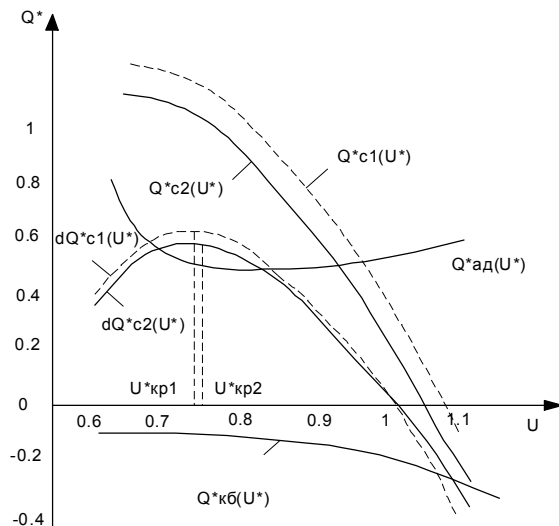


Рис. 3. Вплив компенсації реактивної потужності на стійкість асинхронних вузлів навантаження

По рис. 5 знаходимо значення критичної напруги: при відсутності компенсації $U_{*кp.1} = 0,745$; при включенні конденсаторної батареї $U_{*кp.2} = 0,76$. Запас стійкості $K_{3U1} = 100(1 - 0,745) = 25,5\%$; $K_{3U2} = 100(1 - 0,76) = 24\%$.

Таким чином, підключення конденсаторної батареї знижує вимоги до рівня напруги на шинах ГПП, але погіршує умови статичної стійкості вузла навантаження. Порівняння результатів розрахунку вручну з результатами одержаними за допомогою програми зведені в табл. 1. За результатами розрахунку видно, що розрахунок програми та розрахунок вручну майже співпадають, тому робимо висновок, що програма якісно забезпечить розрахунок впливу компенсації реактивної потужності на стійкість асинхронних двигунів.

Таблиця 1
Результати розрахунку стійкості двигунів
вручну та за допомогою програми

Параметр,	Результат		Розходження	
	Розрахунок вручну	Розрахунок програми	одиниць	%
$P_{*a,д1ном}$	0,892	0,890	0,002	0,2
$Q_{*a,д1ном}$	0,457	0,456	0,001	0,2
$P_{*a,д}$	0,777	0,774	0,003	0,38
$Q_{*a,д}$	0,399	0,398	0,001	0,25
Q_{*c2}	0,136	0,135	0,001	0,73
$U_{*c0,1}$	1,23	1,232	0,002	0,16
$U_{*c0,2}$	1,186	1,186	0	0
$Q_{*c1}(U^*)$	0,363	0,362	0,001	0,27
$Q_{*c2}(U^*)$	0,125	0,119	0,006	4,8
$Q_{*a,д}(U^*)$	0,389	0,398	0,009	2,3
$Q_{*к,б}(U^*)$	0,263	0,263	0	0
ΔQ_{*c1}	0	-0,037	0,037	3,7
ΔQ_{*c2}	0	-0,016	0,016	1,6

Висновки

Питання стійкості асинхронних вузлів навантаження присвячено багато робіт в науковій літературі. Проблема стійкості багатомашинних ЕТС продовжує залишатися актуальною для великих промислових підприємств з безперервним технологічним процесом. Швидкий розвиток отримують системи електропостачання промислових підприємств, транспорту, міст, сільського господарства і інших галузей народного господарства, які є основними споживачами електричної енергії, що виробляється. Велике значення має підвищення надійності і економічності СЕП в різних режимах і умовах їх експлуатації. У зв'язку із збільшенням потужностей вузлових пунктів навантажень і СЕП в цілому останніми роками в Україні і за кордоном багато уваги приділяється аналізу і розробці методів дослідження перехідних процесів в СЕП, направлених на підвищення їх стійкості. Навіть короточасні перерви в нормальній роботі двигунів можуть привести до тривалих порушень технологічних процесів. Тому розрахунки стійкості двигунів обов'язково повинні виконуватися на стадії проектування промислових підприємств. Для практичної оцінки стійкості асинхронних двигунів в залежно-

сті від ступеню компенсації реактивної потужності була проаналізована і створена комп'ютерна програма USTAD мови програмування Object Pascal середовища Delphi 7, що дозволяє на практиці робити оцінку зміни стійкості електродвигунів при виборі пристроїв, що компенсують, що якісно підвищує ефективність роботи асинхронних двигунів.

Список літератури

1. Ершов М.С. Итоги исследования устойчивости промышленных электротехнических систем с асинхронной двигательной нагрузкой / М.С. Ершов, А.В. Егоров // Труды Российского гос. университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2003. – Вып. 3. – С. 43-51.
2. Захаров П.А. Исследование переходных режимов работы асинхронного двигателя / П.А. Захаров, А.М. Захаров // Электротехника. – 2000. – № 3. – С. 54-58.
3. Таранов Д.М. Исследование динамической устойчивости асинхронных электроприводов со случайной нагрузкой / Д.М. Таранов, К.Н. Лебедев // Электротехнологии и электрооборудование в с.-х. пр-ве – 2002. – Вып. 1. – С. 96-100.
4. Бесараб А.Н. Упрощенная модель анализа электромагнитных и электромеханических переходных процессов в системе электроснабжения / А.Н. Бесараб, В.Н. Невольниченко // Электромашинобудування та електрообладнання. – 2001. – Вып. 56. – С. 87-91.
5. Паули В.К. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии / В.К. Паули, Р.А. Воронников. – М.: Энергоэксперт, 2007. – 224 с.
6. Михайлов В.В. Математическая модель узла нагрузки с асинхронными и синхронными двигателями / В.В. Михайлов, В.К. Лебедев // Электротехнические и электромеханические системы. – 2005. – С. 66-75.
7. Сулейманлы Л.Э. Новый критерий для расчета статической устойчивости узлов нагрузки электрической системы / Л.Э. Сулейманлы // Проблемы энергетики. – 2005. – № 3. – С. 22-26.
8. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов. – М., Энергия, 1979– 456 с.
9. Винославский В.Н. Переходные процессы в системах электроснабжения / В.Н. Винославский. – К.: Выси. шк., 1989. – 422 с.

Надійшла до редколегії 22.12.2015

Рецензент: д-р техн. наук проф. Г.І. Канюк, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків.

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ВЛИЯНИИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

А.Б. Егоров, О.Ю. Егорова

Проблема устойчивости многомашинных электротехнических систем продолжает оставаться актуальной для крупных промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом. Большое число таких предприятий сосредоточено в нефтяной и газовой отраслях промышленности, особенно в их перерабатывающих и транспортных структурах. Опыт эксплуатации, исследования показывают, что устойчивость электротехнических систем может нарушаться как при внешних (провалах напряжения), так и при внутренних (короткие замыкания) возмущениях. Предложено программное обеспечение расчета устойчивости асинхронных двигателей с учетом мощности компенсирующих устройств.

Ключевые слова: энергосбережение, асинхронный двигатель, реактивная мощность, регулирование электроэнергии.

INCREASE RESISTANCE TO IMPACT INDUCTION MOTOR REACTIVE POWER COMPENSATION

A.B. Egorov, O.Yu. Egorova

The problem of stability multicompartment electrical systems continues to be relevant for large industrial enterprises with continuous production process. A large number of such enterprises is concentrated in the oil and gas industries, especially in their processing and transport structures. Operating experience, studies show that resistance can be broken electrical systems both in external (voltage dip) and for internal (short circuit) disturbances. A calculation software stability induction motors with regard compensating power devices.

Keywords: energy saving induction motor, reactive power regulation electricity.