

**Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет**

М. Й. Бурбело, А. В. Гадай

**ДИНАМІЧНА КОМПЕНСАЦІЯ
РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

Монографія

**Вінниця
ВНТУ
2010**

УДК 621.316.71

ББК 31.279

Б 91

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №7 від 25.02.2010 р.)

Рецензенти:

Ю. О. Варецький, доктор технічних наук, професор

В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор

Бурбело, М. Й.

Б 91 Динамічна компенсація реактивної потужності в пускових режимах електроприводів : монографія / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 104 с.

ISBN 978-966-641-368-3

В монографії обґрунтовано можливість підвищення точності процесу динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних та синхронних електроприводів в електропостачальних системах обмеженої потужності.

Монографія розрахована на широке коло інженерно-технічних працівників та аспірантів, які досліджують проблему покращення якості електроенергії.

УДК 621.316.71

ББК 31.279

ISBN 978-966-641-368-3

© М. Бурбело, А. Гадай, 2010

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	8
1.1 Аналіз впливу пуску двигунів на відхилення напруги у вузлі навантаження	8
1.2 Аналіз критеріїв ефективності та методів дослідження пуско- вих режимів електроприводів	14
1.3 Пристрої динамічної компенсації реактивної потужності	17
Висновки до розділу 1	28
РОЗДІЛ 2. КРИТЕРІЇ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	30
2.1 Характеристика процесу компенсації реактивної потужності в пускових режимах роботи АД з використанням спектральних провідностей	30
2.2 Математичні моделі асинхронних двигунів в пускових режимах	37
2.3 Аналіз динамічної компенсації реактивної потужності в пус- кових режимах асинхронних двигунів	43
2.4 Аналіз знижень напруги під час пуску асинхронних двигунів за динамічної компенсації реактивної потужності	49
Висновки до розділу 2	56

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПУСКОВИХ ТА КОМПЕНСУВАЛЬНИХ РЕЖИМІВ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ	57
3.1 Моделювання пускових процесів синхронних двигунів	57
3.2 Моделювання процесу динамічної компенсації реактивної потужності з використанням синхронних двигунів	67
Висновки до розділу 3	71
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СИСТЕМ ДИНАМІЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....	72
4.1 Системи динамічної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів на основі СТК	72
4.2 Розробка вимірювальних каналів для систем динамічної компенсації реактивної потужності.....	81
Висновки до розділу 4	91
ВИСНОВКИ.....	92
ЛІТЕРАТУРА	93

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун
АД ФР – асинхронний двигун з фазним ротором
АРЗ СД – автоматичне регулювання збудження СД
БК – блок керування
БТРР – блок тиристорно-регульованих реакторів
ВДТ – вольтододатковий трансформатор
Д – джерело живлення
ДН – дільник напруги
ЕПС – електропостачальна система
ЗЗК – задавач зони керування
К – ключ силовий
КБ – конденсаторна батарея
КЛ – кабельна лінія електропередачі
КП – квазізрівноважений вимірювальний перетворювач
КУ – конденсаторна компенсаційна установка
МК – однокристальний мікроконтролер
Н – навантаження
ОВ – одновібратор
ОП – операційний підсилювач
ПВ – пристрій віднімання
ПЕ – пороговий елемент
ПК – пристрій коректування
ПЛ – повітряна лінія електропередачі
ПН – вимірювальний перетворювач напруг
ПП – вимірювальний перетворювач реактивної потужності
ПС – вимірювальний перетворювач струмів
ПФС – вимірювальний перетворювач фазового зсуву
Р – регулятор
СД – синхронний двигун
СІФК – система імпульсно-фазового керування
СКЗ – сенсор короткого замикання
СТК – статичний тиристорний компенсатор реактивної потужності
СФ – силовий фільтр
Т – трансформатор силовий
ТН – трансформатор напруги вимірювальний
ТПП – тиристорно-перемикальний пристрій
ТРК – тиристорно-реакторне коло
ТРР – тиристорно-регульований реактор
ТС – трансформатор струму вимірювальний
ФІ – формувач імпульсів
ФП – фазочутливий інтегрувальний перетворювач

ВСТУП

Пускові струми потужних синхронних (СД) та асинхронних (АД) двигунів зумовлюють різке зниження напруги у вузлі мережі. Це спричинює ряд негативних наслідків, до яких можна віднести збільшення тривалості пуску двигунів, зменшення запасу статичної та динамічної стійкості вузлів електричних мереж, зокрема, в електропостачальних системах (ЕПС) обмеженої потужності.

Одним із ефективних заходів підвищення рівня напруги під час пуску двигунів є динамічна компенсація реактивної потужності. Водночас для регулювання силових елементів пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності в перехідних режимах необхідним є визначення їх оптимальних параметрів та оцінка ефективності процесу пуску.

Задача вибору оптимальних параметрів в перехідних режимах ускладнюється, оскільки реактивна потужність АД та СД є складною функцією моменту навантаження, напруги у вузлі мережі, яка, в свою чергу, залежить від напруги на шинах підстанції, опорів мережі та двигуна, струму збудження синхронних машин, а також залежить від нелінійності кривої намагнічування магнітопроводу АД. У зв'язку з цим відсутні еквівалентні пасивні параметри, які можна було б однозначно використовувати як розрахункові в пускових режимах електроприводів, забезпечивши при цьому мінімальний вплив статичних характеристик вузлів навантажень.

В сучасних умовах експлуатації електричних мереж номінальною напругою 6, 10 кВ для забезпечення компенсування реактивної потужності і для мінімізації відхилень напруги при добових змінах навантаження застосовують нерегульовані конденсаторні установки (КУ) та СД. Пристрої для динамічної компенсації реактивної потужності в пускових режимах електроприводів практично не використовують.

Тому науково-прикладна задача, яка полягає у підвищенні точності процесу динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску потужних асинхронних та синхронних електроприводів в ЕПС обмеженої потужності, є актуальною.

У першому розділі монографії проведено аналіз та огляд особливостей роботи електричних мереж за наявності потужних асинхронних та синхронних двигунів. Особлива увага приділена визначен-

ню втрат напруги в пускових режимах і взаємовпливу напруги у вузлі мережі та реактивної потужності навантаження. Розглянуто критерії ефективності та методи аналізу пускових режимів. Проведено аналіз існуючих пристроїв для динамічної компенсації реактивної потужності. Обґрунтовано необхідність пошуку нових рішень в області інформативних параметрів систем керування пристроями динамічної компенсації реактивної потужності.

У другому розділі запропоновано новий метод аналізу АД в пускових режимах, в основу якого покладено використання спектральних параметрів. Запропоновано критерії якості пускових процесів асинхронних та синхронних електроприводів, які основані на використанні спектральних провідностей, що дає можливість оцінювання точності компенсації реактивної потужності під час пуску електроприводів. Розроблено математичні моделі аналізу пускових режимів асинхронних електроприводів, які базуються на використанні нелінійних диференціальних рівнянь в ортогональних координатах, що дозволяє проаналізувати швидкодіюче компенсування реактивної потужності в пускових режимах асинхронних електроприводів. Отримано умови повної компенсації реактивної потужності під час пуску двигуна, які є наслідком адекватності зміни струму та напруги двохелементної паралельної схеми заміщення зі змінними активною та реактивною спектральними провідностями змінам струму та напруги статора двигуна.

В третьому розділі розроблено математичні моделі та програми розрахунку перехідних процесів під час пуску синхронних двигунів та розрахунку їх пускових характеристик. Показано, що форсування струму збудження може різко впливати на зміни реактивної потужності. Але при цьому виникають коливання активної потужності, що вимагає використання системи автоматичного демпфування коливань. Динамічна компенсація реактивної потужності забезпечує виключення провалу напруги у вузлі навантаження у разі форсування струму збудження СД.

В четвертому розділі розглянуто системи динамічної компенсації реактивної потужності на базі статичних тиристорних компенсаторів (СТК) з керуванням за відхиленням та збуренням. Розроблено вимірювальні канали для систем динамічного компенсування реактивної потужності в пускових режимах електроприводів, швидкодія яких не перевищує половини періоду напруги живлення.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

1.1. Аналіз впливу пуску двигунів на відхилення напруги у вузлі навантаження

Схеми електропостачання за наявності потужних асинхронних та синхронних електроприводів залежать від частки їх потужності у загальному навантаженні. Як правило схеми електропостачання – ра-

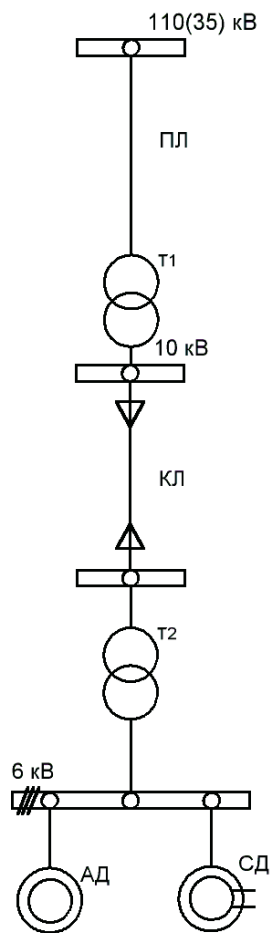


Рис. 1.1. Схема електропостачання за наявності потужних електродвигунів

діальні з двома трансформаціями напруги і містять декілька відхідних приєднань, від кожного з яких може житись декілька одночасно працюючих технологічних установок, а також інших приймачів електроенергії. В деяких мережах для живлення потужних синхронних електроприводів використовується глибокий ввід. У загальному випадку схема електропостачання (рис. 1.1) складається з повітряної лінії електропередач (ПЛ) напругою 110 або 35 кВ, трансформатора 110(35)/10 кВ Т1, кабельної лінії електропередач (КЛ), трансформатора 10/6 кВ Т2, синхронних (СД) і асинхронних (АД) двигунів. Трансформаторні підстанції 10/6 кВ для живлення потужних АД та СД живляться від трансформаторних підстанцій 110(35)/10 кВ в основному КЛ довжиною до одного кілометра.

Встановлена потужність силових трансформаторів напругою 110(35)/10 складає 6300...25000 кВА, а 10/6 кВ – 630...6300 кВА за встановленої потужності споживачів 250...3000 кВА. Співмірність цих потужностей і наявність ліній електропередач значної довжини призводить до погіршення показників якості напруги на затискачах електроприймачів. При ро-

боті АД та СД в мережах обмеженої потужності в першу чергу погіршуються такі показники якості електроенергії як відхилення і коливання напруги [1, 2].

Якість напруги у вузлах навантажень електричних мереж регламентується ГОСТ 13109–97 [3] і контролюється за допомогою реєструючих приладів і статистичних аналізаторів якості напруги [1, 4]. Для визначення інтегральних показників якості електроенергії розроблені статистичні методи дослідження [4–7].

Але самих лише заходів, які контролюють показники якості електроенергії, недостатньо. Необхідна розробка і впровадження спеціальних пристроїв автоматичного регулювання реактивної потужності, які забезпечують поліпшення цих показників у вузлі навантаження електричної мережі.

Задача оптимізації показників якості електроенергії у вузлі навантаження пов'язана, в основному, з відхиленнями і коливаннями напруги, що зумовлені технологічними особливостями виробництва, параметрами ліній електропередачі, наявністю пристроїв регулювання реактивної потужності. За недопустимих значень інших показників якості електроенергії – несинусоїдності та несиметрії напруги – оптимізують вибір відповідних технічних засобів, виходячи з мінімуму витрат на їх впровадження.

Задача покращення показників якості електроенергії стає особливо актуальною в теперішній час економії електроенергії та контролю за раціональним її використанням. Проведені дослідження [2, 8, 9] показали, що значення збитків від відхилення показників якості електроенергії є важливою техніко-економічною характеристикою технологічного об'єкта і може бути критерієм оптимізації регулювання, спрямованого на покращення показників якості електроенергії [1, 7].

Однією з можливих областей застосування систем динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску потужних двигунів є підприємства гірничовидобувної галузі. Підприємства гірничовидобувної галузі, до яких належать установки буріння на нафту і газ, нерудні кар'єри та інші, характеризуються: по-перше, великими одиничними потужностями агрегатів; по-друге, значною неритмічністю виконання технологічних операцій. Так, бурові установки, наприклад, Уралмаш – 3000 ЗУК–1, що призначені для буріння нафтових, газових свердловин глибиною до 3000 м, оснащені груповим приводом лебід-

ки і ротора зі ступінчастим механічним регулюванням швидкості, виконаним від асинхронного двигуна потужністю 500 кВт. Індивідуальний привод двох насосів виконаний від синхронних двигунів потужністю 630 кВт. Максимальна потужність, що споживається буровою установкою дорівнює 1600 кВт – в режимі буріння при роботі двох насосів; 1000 кВт – в режимі виконання спуско-підйомних операцій (з урахуванням потужності механізмів приготування та очищення бурового розчину – відповідно 1900 і 1300 кВт, напруга живлення 6 кВ). На рис. 1.2 наведено схему електропостачання бурової установки.

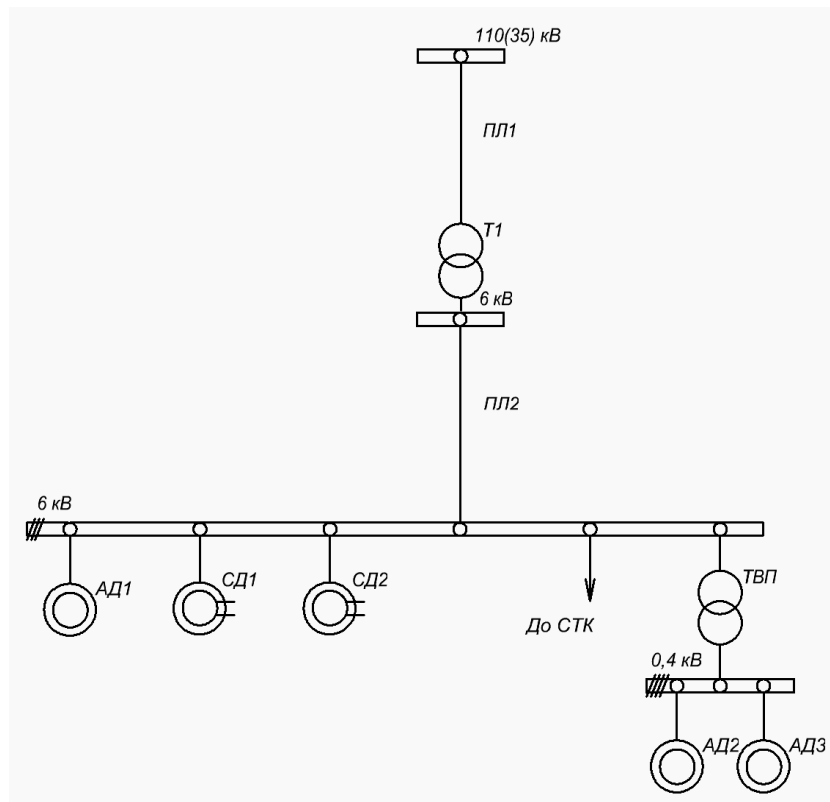


Рис. 1.2. Схема електропостачання бурової установки

Для визначення показників якості електроенергії необхідні досить точні методики розрахунку реактивної потужності електричних двигунів, рівня напруги мережі з врахуванням параметрів елементів ЕПС та електропривода і їх взаємного впливу. Для визначення зниження напруги на затискачах групи електродвигунів, що живляться по лініях електропередачі Л1 та Л2 через трансформатор Т1, розглянемо схему заміщення вузла навантаження (рис. 1.3).

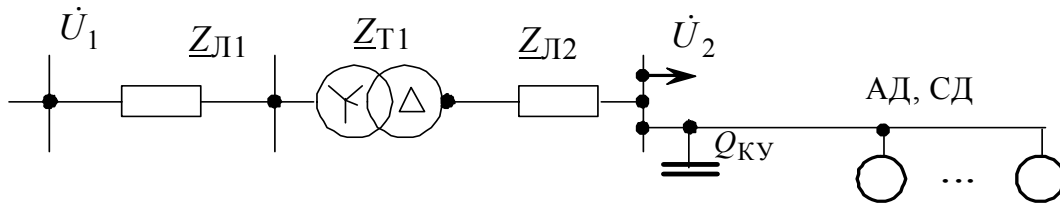


Рис. 1.3. Розрахункова схема вузла навантаження

При відомих значеннях коефіцієнтів завантаження двигунів за активною та реактивною потужностями втрати напруги складуть

$$\Delta U = \frac{R \sum \beta_i P_{\text{ном.}i} + X \sum (\alpha_i Q_{\text{ном.}i} - Q_{\text{КУ}})}{U_1}, \quad (1.1)$$

де R, X – активний і реактивний опори ліній електропередач та трансформатора; $P_{\text{ном.}i}, Q_{\text{ном.}i}$ – номінальні значення активної та реактивної

потужностей двигунів; $\beta_i = \frac{\Delta P_i}{P_{\text{ном.}i}}$; $\alpha_i = \frac{\Delta Q_i}{Q_{\text{ном.}i}}$ – коефіцієнти заван-

таження двигунів за активною та реактивною потужностями; U_1 – значення напруги зі сторони живлячої мережі. Підсумовування проводиться за кількістю одночасно увімкнених електроприводів.

Значення напруги на затискачах установки

$$U_2 = U_1 - \Delta U.$$

Отже, характер зміни напруги на вводі установки залежить не тільки від опору ліній електропередач та трансформатора, але й від режиму роботи споживачів установки. Для визначення відхилення напруги на затискачах установки необхідні імовірнісні характеристики величини навантаження двигунів в залежності від технологічних режимів роботи.

Коефіцієнт завантаження під час пуску двигунів за активною потужністю β_i може змінюватись в інтервалі до $\beta_{\text{max}}=2,2\dots2,5$. Водночас, коефіцієнт завантаження двигуна за реактивною потужністю α_i змінюється в порівняно ширших межах до $\alpha_{\text{max}} = 3\dots5$.

Під час пуску АД та СД характерним є істотне збільшення споживання активної та реактивної потужностей, а також струму. Харак-

тер споживання активної та реактивної потужностей асинхронних і синхронних електроприводів визначається моментом навантаження. Значення активної та реактивної потужностей і струму АД можна визначити за спрощеними формулами

$$P = \frac{U^2 \frac{R_r}{s}}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X^2} = M\omega_0 / p_0; \quad Q = \frac{U^2 X}{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X^2}; \quad I = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X^2}}, \quad (1.2)$$

де U – напруга у вузлі електричної мережі; R_r – активний опір ротора; $X = X_s + X_r$ – сумарний реактивний опір статора і ротора двигуна; s – ковзання ротора; M – механічний момент навантаження на валу машини; ω_0 – колова частота напруги живлення; p_0 – число пар полюсів.

Для явнополюсного СД згідно з [10, с. 622] активна потужність

$$P = -\frac{3U}{\omega_0 L_d} \left(E \sin \theta + \frac{U}{2} \sin 2\theta \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \right) = M\omega_0 / p_0, \quad (1.3)$$

де E – ЕРС, що наводиться струмом збудження в обмотці якоря; θ – кут навантаження СД; L_d, L_q – індуктивності статорної обмотки відповідно по повздовжній і поперечній осях.

Реактивна потужність явнополюсного СД згідно з [10, с. 622]

$$Q = -\frac{3U}{\omega_0 L_d} \left(E \cos \theta - U \left(1 + \sin^2 \theta \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) \right) \right). \quad (1.4)$$

ЕРС, що наводиться струмом збудження в обмотці якоря, визначається за формулою

$$E = p_0 \omega M_{sf} I_f, \quad (1.5)$$

де ω – частота обертання ротора; M_{sf} – взаємоіндуктивність між обмотками статора та ротора; I_f – струм обмотки збудження.

Приріст генерованої реактивної потужності СД в результаті зміни навантаження на валу машини можна визначити за формулою

$$\Delta Q = P_{\text{ном}} \left(\sqrt{(k_H \cdot \varepsilon_1)^2 - \beta_1} - \sqrt{(k_H \cdot \varepsilon_2)^2 - \beta_2} \right),$$

де ε_1, β_1 та ε_2, β_2 – відносні значення струму збудження та навантаження на валу СД в двох режимах.

Існує ряд аналітичних методів точного визначення реактивної потужності СД [11, 12], які враховують зміну напруги мережі і активного опору статора двигуна; насичення синхронної машини по поздовжній осі; врахування насичення синхронної машини при зміні напруги мережі і лінеаризованих нелінійних електромагнітних зв'язків в машині. Але практичного використання вони не знайшли через складність отримання динамічних індуктивностей реакції якоря насиченого СД.

Розрахункові дані показують, що реактивна потужність СД є складною нелінійною функцією навантаження і напруги мережі та струму збудження. В діапазоні зміни навантажень, що не перевищують номінальні значення для СД з відношенням короткого замикання $ВКЗ = 0,84$, при зменшенні рівня напруги реактивна потужність СД зменшується. При збільшенні кратності навантаження двигуна понад 1,5 і номінальному струмі збудження реактивна потужність синхронного двигуна стає споживаною (індуктивною) незалежно від рівня напруги мережі.

Споживана СД реактивна потужність при відхиленнях напруги мережі від 0,9 до 1,15 змінюється в залежності від навантаження в межах 20...60 %. Враховуючи, що ці межі відхилення напруги насправді існують при експлуатації двигунів, то робота СД з нерегульованим (часто номінальним) струмом збудження є доцільною. Однак це призводить до порушення балансу реактивної потужності, що за наявності лінії електропередачі великої довжини викликає непотрібні перетоки реактивної потужності, а отже, збільшуються втрати енергії і відхилення напруги, що погіршує техніко-економічні показники ЕПС.

Збільшення напруги на затискачах СД призводить до значного погіршення його компенсаційної здатності (більше ніж вдвічі при неробочому ході двигуна і змін напруги від 1 до 1,15).

Враховуючи взаємозв'язок реактивних потужностей і напруг, розрахунок необхідно виконувати методом послідовних наближень.

1.2. Аналіз критеріїв ефективності та методів дослідження пускових режимів електроприводів

Задача підтримання оптимальної напруги у вузлі навантаження є складною оптимізаційною задачею. Критеріями оптимальності при вирішенні задачі поліпшення показників якості електроенергії можуть бути: мінімум дисперсії напруги, мінімум споживаної реактивної потужності вузла навантаження; мінімум втрат активної потужності в елементах ЕПС тощо [5, 13, 14].

Проведені теоретичні дослідження і дані експлуатації АД та СД в електричних мережах обмеженої потужності [15–17] показують, що їх показники якості режимів роботи низькі і вимагають істотного покращення. Значно покращити, або частково оптимізувати їх можна за допомогою автоматичного регулювання струму збудження СД, а також пристроїв індивідуальної та групової компенсації реактивної потужності АД. Встановлені у вузлі навантаження СД можна і потрібно використовувати для поліпшення показників якості електроенергії. В літературі ставиться і вирішується задача визначення оптимального, нерегульованого струму збудження, при якому забезпечується мінімум зведених витрат на виробництво і розподіл реактивної потужності в вузлі навантаження, включаючи і мінімум втрат електроенергії в синхронному двигуні і елементах мережі. Оптимальний струм збудження визначається на основі сумарних втрат, які впливають на тепловий режим роботи синхронного двигуна.

В [18] пропонується узагальнений техніко-економічний критерій, який ґрунтується на мінімумі розрахункових витрат при порівнянні різних законів автоматичного регулювання збудження (АРЗ) СД. При визначенні розрахункових витрат повинні враховуватись вартість регульовальних і компенсаційних пристроїв, вартість втрат електричної енергії в елементах мережі по шляху передачі реактивної потужності із системи в даний вузол навантаження; вартість електроенергії, спожитої СД тощо.

При використанні СД для регулювання напруги мережі його система АРЗ складається з двох контурів регулювання – внутрішнього і зовнішнього [19–25]. Внутрішній контур використовується для підтримання оптимальних умов роботи самого двигуна, а саме стійкості його роботи і запобігання коливань. Зовнішній контур призначений

для компенсації реактивної потужності. При виборі системи АРЗ пропонуються різні критерії, а саме: мінімізації, квадратично-інтегральний критерій, модуль реактивної потужності, статистичний критерій, збитки від втрат енергії та інших явищ, включаючи технологічний. Різноманіття критеріїв викликає труднощі у використанні СД для регулювання напруги у вузлах навантаження і особливо при синтезі систем АРЗ.

Так як статистичний критерій регулювання безпосередньо не враховує миттєвих змін параметрів СД, зумовлених технологічним процесом, тому його необхідно доповнити іншим, який залежить від характеру навантаження електропривода і умов роботи ЕПС. В якості другого критерію доцільно приймати ті параметри, які забезпечують необхідну перевантажувальну здатність СД: швидке гасіння коливань ротора СД, мінімальні коливання напруги у вузлі навантаження тощо. Таким чином, необхідно використовувати регулювання збудження СД сильної дії. Це регулювання може виконуватись за кутом, активною складовою струму статора, відхиленням напруги і їх похідних – тобто використовується параметричне АРЗ.

З короткого аналізу випливає, що існуючі оцінки і критерії оптимізації режимів роботи СД не враховують особливості їх роботи в електричних мережах обмеженої потужності. Відсутні також обґрунтування вибору і розробки найдоцільніших способів регулювання реактивної потужності.

Критеріями регулювання струму збудження СД в ЕПС обмеженої потужності можуть бути:

1. В усталених режимах:
 - 1.1 Забезпечення перевантажувальної здатності двигуна;
 - 1.2 Мінімум відхилення напруги від номінального значення з короткочасним її форсуванням;
 - 1.3 Мінімум критеріальної функції, пропорційної навантаженню і квадрату відхилення напруги;
 - 1.4 Мінімум втрат електроенергії.
2. В пускових режимах:
 - 2.1 Обмеження максимального моменту;
 - 2.2 Обмеження максимального пускового струму;
 - 2.3 Мінімум втрат електроенергії;

2.4 Відсутність коливань моменту;

2.5 Тривалість пуску, що визначається середнім значенням моменту.

Аналітичні методи дослідження пускових режимів [26] вимагають виконання великої попередньої роботи конкретно для кожного виду задач і не забезпечують високу точність визначення часу перехідного процесу, миттєвих значень струму і напруги при живленні СД від ЕПС обмеженої потужності.

При вивченні пускових режимів роботи асинхронних та синхронних двигунів достатньо точні результати можна отримати використовуючи чисельні методи [27, 28]. Тут використовуються методи, які ґрунтуються на повних рівняннях Парка-Горєва [29–31]. При дослідженні пускових режимів велика увага приділяється впливу насичення на характеристики машин. Вказані методи мають достатню точність і отримали розповсюдження для розрахунків і конструювання синхронних машин, але вони є трудомісткими і вимагають значного машинного часу при розрахунках.

В літературі велика увага приділяється методам дослідження динамічної стійкості СД за різких змін навантаження, напруги живлячої мережі тощо. Прості методи перевірки динамічної стійкості СД [32] методом площ є наближеними і використовуються для визначення граничнодопустимого збурення, за якого СД зберігає стійкість. Аналітичні методи [33–36] не забезпечують точність розрахунку при дослідженні СД в ЕПС обмеженої потужності. Точнішими є методи [26] з використанням аналітичних залежностей, які ґрунтуються на принципі накладання потужностей [37] і вимагають зняття експериментальних частотних характеристик вузла навантаження електричної мережі. Однак вони є трудомісткими. Трудомістким є також і метод [38], який ґрунтується на побудові функцій Ляпунова, що характеризують загальні залежності і властивості системи.

В більшості випадків в основу математичних моделей електричних машин, які розв'язуються в фазних координатах, покладений метод потокозчеплення. При цьому їх диференціальні рівняння записуються в нормальній формі Коші (відносно потокозчеплень). Вихідна система рівнянь складається з рівнянь самих елементів електричної системи і структурних рівнянь, які відображають спосіб з'єднання елементів. На основі цих рівнянь формується кінцеве рівняння,

зв'язане із спільним груповим вузлом. В результаті розв'язання кінцевого рівняння вихідна система рівнянь розпадається на незалежні підсистеми, які відповідають окремим елементам електричної системи (двигуни, трансформатори тощо), які легко розв'язуються на ЕОМ. Вказаний метод прийнятий як основний при розробці методики розрахунку і дослідження перехідних режимів роботи електроприводів установок.

При розрахунку перехідних процесів за методом потокозчеплення [39], який разом із врахуванням нелінійності (насичення) кола намагнічування машини дозволяє досліджувати кілька одночасно працюючих АД і СД з врахуванням параметрів живлячої мережі, тобто трансформаторів і ліній електропередачі, значно зменшується обсяг обчислень і забезпечується висока точність розрахунку.

При дослідженні режимів роботи групи СД, крім аналітичних методів [40, 41], використовуються чисельні методи. Методи ґрунтуються на рівняннях Парка-Горєва [42–47], і задачі вирішуються, як правило, в фазних координатах [48, 49]. Для оцінки режимів роботи окремих або групи одночасно працюючих двигунів у вузлі навантаження електричної мережі необхідно визначити показники якості перехідних процесів, до яких можна віднести час, вид коливань і статичну стійкість [50, 51]. Для нелінійних систем використовуються інтегральні квадратичні показники якості перехідного процесу [52].

Режими пуску та самозапуску АД і СД досліджено в фундаментальних роботах І. А. Сиромятникова [53]. Однак питання динамічної компенсації реактивної потужності під час пуску не вивчалися.

1.3. Пристрої динамічної компенсації реактивної потужності

Робота пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності (КРП) основана на використанні силових комутаційних або тиристорних ключів, тиристорно-регульованих реакторів та нерегульованих або дискретно-регульованих конденсаторних батарей в якості джерел реактивної потужності. Пристрої динамічної КРП відрізняються способом увімкнення конденсаторних батарей та способом керування (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Класифікація пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності

Найпростішими є пристрої, в яких використано вимикачі, контактори або тиристорні ключі для перемикавання конденсаторів. В [54] описаний пристрій (рис. 1.5) регулювання напруги, який складається з секціонованої конденсаторної батареї КБ з повздовжньою $C1$ і поперечною $C2$ секціями конденсаторів, силових ключів $K1-K3$, тиристорного ключа ТК, діодів $VD1, VD2$, порогового елемента ПЕ, несиметричного дільника напруги ДН, регульованого резистора R , вимірювальних перетворювачів напруги ПН, струму ПС та потужності ПП, блока керування БК.

Перетворювачі напруги ПН і струму ПС подають сигнали, пропорційні відповідно напрузі мережі і струму навантаження, на перетворювач потужності ПП. При глибокому зменшенні напруги в електричній мережі, зумовленому пусковим струмом асинхронного двигуна, вихідний сигнал перетворювача реактивної потужності ПП в початковий період має ємнісний характер. Тоді блок керування БК замикає ключ $K2$, а ключі $K1$ та $K3$ розмикає. Таким чином поздовжня секція $C1$ конденсаторної батареї КБ вмикається в мережу, а поперечна секція $C2$ – паралельно навантаженню Н. При пуску напруга на секції $C1$ збільшується пропорційно пусковому струму і її реактивному опору. Ця напруга збільшується поки падіння напруги на поздовжній секції $C1$ не стане рівною падінню напруги в усталеному режимі з на-

пругою живлення $0,92 U_{\text{НОМ}}$. При вказаному рівні падіння напруги на поздовжній секції $C1$ спрацює пороговий елемент ПЕ. Тоді ТК відкривається і шунтує повздовжню секцію $C1$ через регульований резистор R . Після пуску двигуна, якщо напруга мережі менша $0,92 U_{\text{НОМ}}$, то напруга на поздовжній секції $C1$ буде недостатньою для підтримання ТК у відкритому стані, він закриється і поздовжня секція $C1$ працюватиме послідовно з навантаженням Н.

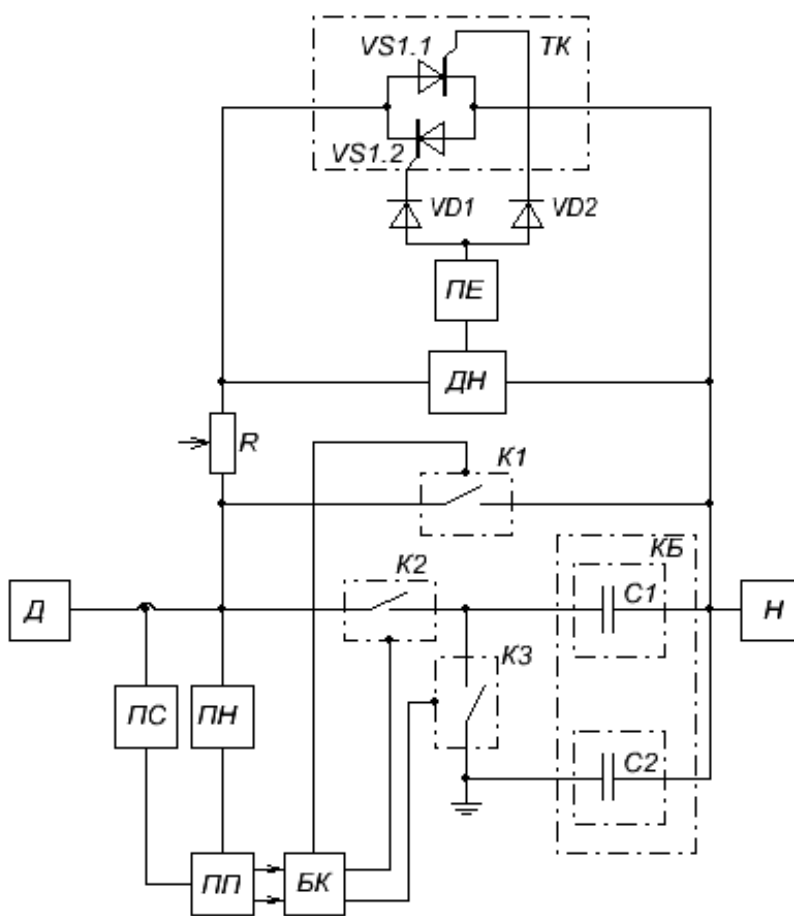


Рис. 1.5. Пристрій для КРП з використанням дискретно-регульованих конденсаторів

В [55] описано пристрій повздовжньо-поперечного регулювання напруги та реактивної потужності в протяжних мережах напругою $0,4-0,69-12$ кВ, які живлять потужні асинхронні двигуни. Пристрій

(рис. 1.6) складається з послідовного вольтододаткового трансформатора ВДТ, конденсаторної батареї КБ, регульованого резистора $R1$, первинного $K1$ і вторинного $K2$ силових ключів, вимірювального перетворювача напруги ПН, сенсора короткого замикання СКЗ та блока керування БК. Первинна обмотка ВДТ ввімкнена послідовно з лінією живлення навантаження Н. До вторинної обмотки ВДТ приєднана конденсаторна батарея КБ.

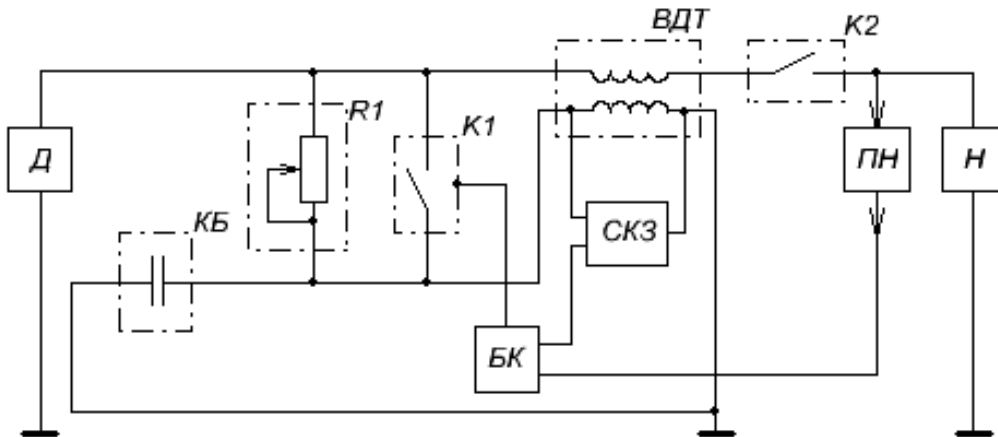


Рис. 1.6. Пристрій для КРП
з поздовжньо-поперечним регулюванням

Суть роботи такого пристрою полягає в наступному. ВДТ виконує дві функції залежно від стану керуваного ключа $K1$. При пусках і значних відхиленнях напруги на навантаженні, наприклад, при перевантаженні або режимах, близьких до перекидання двигуна, керований ключ $K1$ повинен бути розімкнений, і БК здійснює поздовжню компенсацію втрат напруги через ВДТ. При нарузі на навантаженні $U > |U_H - \Delta U_H|$ замість застосування поздовжньої ємнісної компенсації здійснюється автоматичне переведення і вторинної обмотки ВДТ на поперечне ввімкнення, при цьому БК здійснює компенсацію реактивної потужності навантаження, а ВДТ виконує роль трансформатора поперечного регулювання, у якого для створення 5...6 %-ї добавки напруги потрібний коефіцієнт трансформації складає $k_T = 15...20$.

В [56] описано пристрій для поздовжньо-поперечної компенсації втрат напруги та реактивної потужності в довгих електричних мережах напругою 0,4–0,69–1,2 кВ, які живлять потужні асинхронні

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 166 с.
2. Трошин В. А. Об экономической целесообразности использования компенсирующей способности синхронного двигателя для автоматического регулирования напряжения / В. А. Трошин. – В сб.: Регулирование напряжения в электрических сетях. – М. : Энергия, 1968. – С. 315–319.
3. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. – [Введ. с 1999-01-01]. – М.: Стандартинформ, 2006. – 35 с.
4. Баркан Я. Д. Использование статистической информации о качестве напряжения в электрических сетях / Я. Д. Баркан, Н. С. Маркушевич. – М. : Энергия, 1972. – 120 с.
5. Аберсон М. Л. Оптимизация регулирования напряжения / М. Л. Аберсон. – М. : Энергия, 1975. – 160 с.
6. Дмитриева Е. Н. Расчет показателей качества напряжения с учетом взаимного влияния электроприемников через сеть / Е. Н. Дмитриева, И. В. Пушная. // Изв. вузов. Электромеханика. – 1981. – № 2. – С. 190–191.
7. Жежеленко И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – К. : Техніка, 1981. – 160 с.
8. Саяк И. И. О компенсации реактивной энергии в системах электроснабжения ограниченной мощности / И. И. Саяк, Р. А. Селепина // Вестник Львовского политехн. ин-та Энергомеханические и электроэнергетические системы. – Львов: Изд-во Львов.ун-та, 1980. – № 140. – С. 81–83.

9. Трошин В. А. О выборе оптимального режима возбуждения синхронных двигателей / В. А. Трошин // Изв. вузов. Электромеханика. – 1969. – № 5. – С.487–491.
10. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
11. Красник В. В. Автоматические устройства по компенсации реактивных нагрузок в электрических сетях предприятий / В. В. Красник. – М. : Энергия, 1975. – 113 с.
12. Айрапетян Г. А. Расчет на ЭЦВМ режима работы синхронного двигателя при изменении различных параметров режима / Г. А. Айрапетян, Г. А. Налчаджян. – В кн. : Научн. тр. Ереван. политехн. ин-т, 1972. – № 28. – С. 152–159.
13. Баркан Я. Д. Автоматизация режимов по напряжению и реактивной мощности / Я. Д. Баркан. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
14. Князевский Б. А. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. А. Князевский, Б. Ю. Липкин. – М. : Высшая школа, 1986. – 400 с.
15. Блантер С. Г. Выбор параметра и закона регулирования возбуждения синхронных двигателей подъемных лебедок современных буровых установок / С. Г. Блантер, Л. И. Козлова // Машины и нефтяное оборудование. – М. : ВНИИОЭНГ, 1972. – № 5. – С. 3–5.
16. Зубков В. П. Модернизированный автоматический регулятор возбуждения синхронных двигателей буровых механизмов / В. П. Зубков, В. Г. Кузьмин, Р. А. Селепина // Автомат. и телемех. нефтяной промышленности. – М. : ВНИИОЭНГ. – 1978. – № 12. – С. 7–8.
17. Исследование автоматического регулятора возбуждения приводного синхронного двигателя буровой лебедки / [И. И. Саяк, Р. А. Селепина, Г. С. Корниевич, В. Н. Холин] // Машины и нефтяное оборудование. – М., 1975. – № 8. – С. 30–35.

18. Глебов И. А. Система возбуждения и регулирования синхронных двигателей / И. А. Глебов, С. И. Логинов. – Л. : Энергия, 1972. – 112 с.

19. А. с. 434534 СССР. Способ автоматического регулирования напряжения и реактивной нагрузки нагрузочного узла группой синхронных двигателей: / Я. Д. Баркан. – №4653258/21; заявл. 23.03.73; опубл. 30.03.74, Бюл. № 24. – 4 с.

20. Литкенс И. В. Применение метода синтеза регуляторов возбуждения синхронных двигателей, повышающих качество электроэнергии в узлах резкопеременной нагрузки / И. В. Литкенс, Л. М. Погорелов, В. А. Строев // Моск. энерг. ин-та. М., 1974. – ч. II, вып. 171. – С. 21–22.

21. Петелин Д. П. Автоматическое регулирование возбуждения синхронных двигателей / Д. П. Петелин. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1961. – 104 с.

22. Петелин Д. П. Автоматическое управление синхронными электродвигателями / Д. П. Петелин. – М. : Энергия, 1968. – 192 с.

23. Петелин Д. П. Динамика синхронного привода поршневых компрессорных установок / Д. П. Петелин. – М. : Машиностроение, 1976. – 159 с.

24. Системы управления электроприводами и синхронными двигателями с тиристорным возбуждением и автоматическим регулированием возбуждения / [О. Ш. Вайнтриуб, Б. Р. Гендельман, А. Ш. Вейнгер и др.] // Сб. Автоматизированный электропривод. – М. : Энергия. – 1980. – С. 180–185.

25. Zawirski K. Regulacja wzbudzenia silnika synchronicznego optymalna ze wzgledu na oddziaływanie na siec zasilajace / K. Zawirski // Arch. Elektrotechniki PRL, XXX. – N 1. – S.177–188.

26. Важнов Р. К. Переходные процессы в машинах переменного тока / Р. К. Важнов. – Л. : Энергия, 1980. – 256 с.

27. Аномальные режимы потужных синхронных машин / [Е. Я. Казовский, Я. Б. Данилевич, Э. Г. Каширский, Г. В. Рубисов] – Л. : Наука, 1969. – 429 с.
28. Копылов И. П. Электромеханические переходные режимы при асинхронном пуске синхронного двигателя / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, Л. Н. Васильев // Электротехника. – 1977. – №1. – С. 6–8.
29. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1950. – 551 с.
30. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей / Л. П. Петров. – М. : Энергоиздат, 1981. – 184 с.
31. Костюк О. М. Колебания и устойчивость синхронных машин / О. М. Костюк, М. И. Соломаха. – К. : Наукова думка, 1991. – 200 с.
32. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М. : Высшая школа, 1985. – 536 с.
33. Блантер С. Г. Исследование колебаний ротора синхронного двигателя буровой лебедки / С. Г. Блантер, Ю. С. Жуков, И. И. Суд // Электричество. – 1966. – № 11. – С. 66–68.
34. Гусейнова Г. Ф. Об одном методе расчета устойчивости и резонансного явления больших колебаний синхронного двигателя узла нагрузки / Г. Ф. Гусейнова // Изв. Вузов. Энергетика. – 1982. – № 2. – С. 90–93.
35. Коноплев К. Г. Включение нагрузки на синхронный двигатель / К. Г. Коноплев // Изв. вузов Энергетика. – 1982. – № 2. – С. 186–190.
36. Расулов М. М. К расчету переходных процессов в синхронном приводе с ЭМС / М. М. Расулов, Л. Ф. Алиев, Е. К. Гусейнов // Изв. вузов Энергетика. – 1975. – № 2. – С. 109–112.
37. Урусов И. Д. Линейная теория колебаний синхронной машины / И. Д. Урусов. – М., Л. : Изд-во АН СССР, 1960. – 416 с.

38. Янко-Триницкий А. А. Новый метод анализа работы синхронных двигателей при резкопеременных нагрузках / А. А. Янко-Триницкий. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1958. – 103 с.

39. Чабан В. Й. Математичне моделювання електромеханічних систем / В. Й. Чабан. – Львів : В-во Держ ун-т „Львівська політехніка”, 1997. – 342 с.

40. Литкенс И. В. Определение статически устойчивых узлов нагрузки / И. В. Литкенс, Н. П. Логинов, А. П. Медов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – № 2. – С. 21–22.

41. Pierre Conrad St. System stability consideration in paper mills / Pierre Conrad St. // IEEE Conf. Res. Annu. Pulp. And Pap Ind. Techn. Conf., San Francisco, Calif., 1977, New York. N. Y. – 1977. – P. 111-123.

42. Горушкин В. И. Определение параметров и устойчивости вынужденных колебаний в многомашинной системе конечной мощности при периодических возмущениях / В. И. Горушкин, И. В. Литкенс, И. К. Сулайманов // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1974. – № 2. – С. 57–65.

43. Данилочкина Л. А. Анализ переходных процессов в узлах нагрузки систем электроснабжения / Л. А. Данилочкина // Тр. Моск. энерг. ин-та. – 1981. – вып. 521. – С. 135–139.

44. Сивокобыленко В. Ф. Модифицированный метод численного интегрирования уравнений Парка-Горева / В. Ф. Сивокобыленко, Х. А. Нехме // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1981. – № 6. – С. 53-60.

45. Страхов С. В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока / С. В. Страхов. – М., Л. : Госэнергоиздат, 1960. – 247 с.

46. Хачатуров А. А. Условия возникновения электромеханического резонанса в сложных электрических системах / А. А. Хачатуров // Электричество. – 1973. – № 1. – С. 6–10.

47. Ramamoorty M. Stabilization of asynchronous motors subjected to voltage dips / M. Ramamoorty, K. R. Padiyar, K. S. Sarma // IEEE Trans. Power Appar. and Syst. – 1979. – № 4. – P.178–186.

48. Галишников Ю. П. О предпочтительной системе относительных единиц для анализа синхронных машин в фазных координатах / Ю. П. Галишников // Изв. вузов. Электромеханика. – 1979. – № 2. – С. 91–92.

49. Совалов С. А. Принципы построения и особенности математических моделей электроэнергетических систем / С. А. Совалов, В. А. Баринов // Электричество. – 1981. – № 4. – С. 1-7.

50. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В. А. Веников. – М. : Высшая школа, 1978. – 415 с.

51. Юревич Е. И. Теория автоматического управления / Е. И. Юревич. – Л. : Энергия, 1969. – 375 с.

52. Барлин А. И. Оценка качества нелинейных систем регулирования / А.И. Барлин. – М. : Наука, 1982. – 181 с.

53. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

54. А. с. 1474794 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/18. Устройство для регулирования напряжения / В. Я. Чаронов, Б. Н. Абрамович, К. А. Анаьев, Л. В. Макурова, П. М. Каменев и Ш. К. Якупов (СССР). — № 4046013/24–07; заявл. 19.09.86; опубл. 23.04.89, Бюл. № 15.

55. А. с. 1677774 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/18. Устройство продольно-поперечного регулирования напряжения сети / К. А. Анаьев, О. В. Иванов, А. В. Гвоздев, Б. П. Коновалов, М. М. Малюшицкий, И. И. Столяров и С. В. Трухалева (СССР). — № 4729517/07; заявл. 18.08.89; опубл. 15.09.91, Бюл. № 34.

56. А. с. 1686597 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/18. Устройство продольно-поперечного регулирования напряжения / К. А. Анаьев, О. В. Иванов, В.П.Ганский, Б. П. Коновалов, С. В. Трухалева и

Е. М. Проскуряков (СССР). — № 4765093/07; заявл. 02.11.89; опубл. 23.10.91, Бюл. № 39.

57. А. с. 1267532 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/18. Устройство для управления источником реактивной мощности / В. А. Горшечников, Г. М. Васильев, А. В. Манин и М. П. Рябов (СССР). — № 3858461/24-07; заявл. 22.02.85; опубл. 30.10.86, Бюл. № 40.

58. А. с. 1275641 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/18. Система электропитания нагрузки / Ю. Е. Варецкий, М. С. Сегеда и Ю. А. Кенс (СССР). — № 3888536/24-07; заявл. 24.04.85; опубл. 07.12.86, Бюл. № 45.

59. А. с. 1347118 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/18. Устройство для компенсации реактивной мощности / А. Л. Шитов и С. Н. Черевань (СССР). — № 4078485/24-07; заявл. 18.06.86; опубл. 23.10.87, Бюл. № 39.

60. А. с. 1443076 СССР, МКИ⁵ Н 02 J 3/18. Регулятор тиристорного компенсатора реактивной мощности / Н. Б. Мещеряков (СССР). — № 3865533/24-07; заявл. 12.03.85; опубл. 07.12.88, Бюл. № 45.

61. А. с. 1372464 СССР, МКИ⁴ Н 02 J 3/12 Н 02 М 5/257. Регулятор напряжения / В. Д. Дудышев, В. М. Нестеренко, М. М. Левинсон и О. Н. Катаев (СССР). — № 3908746/24-07; заявл. 11.06.85; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5.

62. Войтех А. А. Учет коэффициента мощности при оптимизации электромеханических систем для переходных и квазиустановившихся режимов работы / А. А. Войтех, А. Н. Попович, Е. В. Бирик // Технічна електродинаміка. — 2003. — № 2. — С. 36–42.

63. Войтех А. А. Математическая модель оптимального проектирования асинхронного двигателя с предвключенными конденсаторами для тяжелых условий пуска / А. А. Войтех, А. Н. Попович, Е. В. Бирик // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — 2002. — № 1. — С. 361–363.

64. Попович А. Н. Определение и учет коэффициента мощности при улучшении технико-экономических характеристик асинхронных электроприводов в динамических режимах с учетом несимметрии /

А. Н. Попович, Ю. В. Шуруб, Е. В. Бибик // Технічна електродинаміка. – 2003. – № 6. – С. 42–49.

65. Штамбергер Г. А. Измерения в цепях переменного тока (методы уравнивания) / Г. А. Штамбергер. – Новосибирск: Наука, 1972. – 164 с.

66. Теоретические основы электротехники [учебник для вузов.] / [К.С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин] – [Том 1: 4-е изд.]. – СПб. : Питер, 2006. – 463 с.

67. Бурбело М. Й. Компенсація реактивної потужності асинхронних двигунів в різкозмінних режимах навантаження / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 65–68.

68. Визначення електричних параметрів асинхронних двигунів в перехідних режимах із застосуванням методу квазізрівноваження / [М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, В. В. Гаврилюк, В. А. Барчук] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 2. – С. 41–43.

69. Контроль електричних параметрів асинхронних двигунів в перехідних режимах [Електронний ресурс] / [М. Й. Бурбело, В. В. Гаврилюк, О. М. Кравець, А. В. Гадай] // Тези міжнародної науково-технічної конференції „КУСС – 2008”. – Вінниця: ВНТУ. – 2008. – 1 с.: <http://www.vstu.vinnica.ua>.

70. Контроль електричних параметрів асинхронних двигунів в перехідних режимах / [М. Й. Бурбело, В. В. Гаврилюк, О. М. Кравець, А. В. Гадай] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 66–68.

71. Математичні моделі для аналізу перехідних режимів асинхронних двигунів [Електронний ресурс] / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, І. В. Бальзан // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 4. – 4 с. : http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-4.files/uk/08_miboam_ua.pdf

72. Беспалов В. Я. Математическая модель асинхронного двигателя в обобщенной ортогональной системе координат / В. Я. Беспалов, Ю. А. Мощинский, А. П. Петров // Электричество. – 2002. – № 8. – С. 33–39.

73. Бурбело М. Й. Підвищення ефективності електроспоживання асинхронних двигунів в перехідних режимах / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 3. – С. 57–58.

74. Бурбело М. Й. Аналіз асинхронних двигунів в перехідних режимах з використанням спектральних параметрів / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – Вип. 4 (51), ч. 1. – С. 150–154.

75. Бурбело М. Й. Зменшення знижень напруги під час пуску асинхронних двигунів з використанням індивідуальної компенсації реактивної / М. Й. Бурбело, А. В. Гадай // Матеріали II-ї міжнародної науково-технічної конференції „Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”. – Луцьк : Луцький національний техн. університет. – 2008. – С. 37–40.

76. Хрущев В. В. Электрические машины систем автоматики: [учебник для вузов] / В. В. Хрущев. – [2-изд., перераб. и доп.]. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 368 с.

77. Математичні моделі електроенергетичних систем: [навч. посібник] / В. П. Мельник. – К. : ІСДО, 1993.– 336 с.

78. Бернас С. Математические модели элементов электроэнергетических систем / С. Бернас, З. Цек. – М. : Энергоиздат, 1982. – 312 с.

79. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств: [учеб. для студентов вузов, обучающихся по спец. «Электромеханика»] / Ф. М. Юферов. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. шк., 1988. – 475 с.

80. Петухов М. В. Математична модель вузла навантаження / М. В. Петухов, А. В. Гадай, Ю. В. Грицюк // Збірник праць V міжнародної науково-технічної конференції „Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств”. – Маріуполь : Приазовський державний технічний університет. – 2005. – С. 127–130.

81. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1986. – 544 с.

82. Петухов М. В. Дослідження математичної моделі синхронного двигуна / М. В. Петухов, А. В. Гадай, Ю. В. Грицюк // Наукові нотатки ЛДТУ. – Луцьк : Луцький державний технічний університет, міжвузівський збірник. – 2003 – Вип. 13. – С. 245–248.

83. Петухов М. В. Дослідження математичної моделі синхронного двигуна при несинусоїдній напрузі живлення / М. В. Петухов, А. В. Гадай. // Матеріали I міжнародної науково-технічної конференції „Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах”. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2006. – С. 75–78.

84. Гадай А. В. Дослідження математичної моделі синхронного двигуна при несинусоїдній напрузі живлення / А. В. Гадай // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 2. – С. 56–60.

85. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р. М. Матура. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.

86. Дьюды Л. Силовая электроника в энергосистемах: статические компенсаторы реактивной мощности / Дьюды Л. // ТИИЭР. – 1988. – № 4. – С. 14–21.

87. Динамічна компенсація реактивної потужності в перехідних режимах електроприводів [Електронний ресурс] / [М. Й. Бурбело, А. В. Гадай, О. М. Кравець, М. В. Микитенко] // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 3. – 6 с.: http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-3.fils/uk/08mibpio_ua.pdf

88. Петухов М. В. Оптимізація режимів роботи статичних компенсаторів реактивної потужності / М. В. Петухов, Ю. В. Грицюк, А. В. Гадай // Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств: IV Міжнародна наукова конференція. Маріуполь, 2000. – С. 293-297.

89. Петухов М. В. Дослідження математичної моделі параметричного статичного компенсатора реактивної потужності / М. В. Петухов, А. В. Гадай, Ю. В. Грицюк // Вісник НУ „Львівська політехніка” Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2001. – № 421. – С. 154–159.

90. Петухов М. В. Статичні компенсатори реактивної потужності в замкнених системах керування / М. В. Петухов, Ю. В. Грицюк, А. В. Гадай // Наукові нотатки ЛДТУ. – Луцьк : Луцький державний технічний університет, міжвузівський збірник. – 2002. – Вип. 11. – Ч. 2. – С. 48–52.

91. Петухов М. В. Інтегральні показники енергетичного процесу тиристорних компенсаторів реактивної потужності при їх живленні від мережі обмеженої потужності / М. В. Петухов, Ю. В. Грицюк, А. В. Гадай // Вісник Приазовського державного технічного університету. – Маріуполь : ПДТУ, 2005. – С. 100–104.

92. Варецький Ю. О. Режимы электрических сетей и систем электропитания с статическими тиристорными компенсаторами (методология анализа): дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук / Ю. О. Варецький. – Л., 1999. – 301 с.

93. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.

94. Вимірювальні канали для установок динамічної компенсації реактивної потужності / [М. Й. Бурбело, О. М. Кравець, М. В. Никитенко, А. В. Гадай] // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 11. – С. 42–45.

95. Солодухо Я. Ю. Тенденции компенсации реактивной мощности. Ч. 2. Методы и средства компенсации реактивной мощности / Я. Ю. Солодухо // Электротехн. пром-сть. Сер. 05. Полупроводниковые силовые приборы и преобразователи на их основе: Обзор. информ. – М. : Информэлектро, 1988. – Вып. 21. – 49 с.

Наукове видання

**Михайло Йосипович Бурбело
Андрій Валентинович Гадай**

**ДИНАМІЧНА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ
В ПУСКОВИХ РЕЖИМАХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

Монографія

Редактор Н. Мазур

Оригінал-макет підготував А. Гадай

Підписано до друку 6.07.2010 р.
Формат 29,7×42¹/₄ Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 6,01
Наклад 100 прим. Зам № 2010-115

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.