

1 ВПРОВАДЖЕННЯ АСИНХРОНІЗОВАНИХ МАШИН

В зв'язку із значним зростанням цін на енергоносії особливої актуальності набуває проблема енергозбереження. Одним з напрямів у вирішенні цієї проблеми є широке впровадження асинхронізованих машин (АСМ), які можуть застосовуватися як генератори потужних і автономних електроенергетичних систем [24,25,30,34,36,40÷42], регульований електропривод [24,25,28,30,36,38], двигун-генератори гідроакумуючих станцій [44], асинхронізовані машини для гнучкого зв'язку енергосистем [29,35] і інше. Проведемо короткий аналіз основних напрямків впровадження АСМ великої потужності.

Двигуни-генератори гідроакумуючих станцій. Сучасний стан енергетичного ринку призводить до зростання потреби в гідроагрегатах, які були б здатні дуже швидко подавати енергію в енергосистему і також швидко забирати енергію з енергосистеми. Агрегати із змінною частотою обертання, або асинхронізовані гідрогенератори, є гідною відповіддю на такі вимоги. На гідроакумуючих електростанціях асинхронізовані гідрогенератори впроваджують як засоби підвищення ККД і гнучкості управління станцією.

На гідроакумуючих станціях 35 країн світу працюють АСМ потужністю до 500 МВт в режимах генератора і двигуна [44]. Найбільш інтенсивно гідроакумування розвинене в США, Японії, Німеччині, Італії, Франції, Швейцарії. На частку цих країн припадає близько 200 ГАЕС, або 60% їх загального числа. Потужність ГАЕС США і Японії складає близько 40% загальної потужності ГАЕС світу. Зараз в світі будується близько 40 ГАЕС. Можна вважати, що до 2015 року їх загальна потужність істотно зросте в порівнянні з сучасною. Так само, як при будівництві ГЕС, намічається тенденція до збільшення одиничної потужності агрегатів ГАЕС. В таблиці 1.1 приведені характеристики найбільших ГАЕС світу

Таблиця 1.1 – Найбільші ГАЕС світу

ГАЕС або ГЕС-ГАЕС	Країна	Рік пуску в експлуатацію 1-го агрегату	Потужність в турбінному режимі, МВт
Канівська	Україна	Споруджується	3600
Гаунчжоу	КНР	1992	2400
Дністровська	Україна/ Молдова	Споруджується	2268
Бат-Каунти	США	1985	2100
Маунт-Хоуп	США	Споруджується	2000
Ладінгтон	США	1973	1872
Калаян	Філіппіни	1982	1800
Динорвик	ВБ	1984	1800
Гран-Мезон	Франція	1986	1800
Тянхуаньпін	КНР	Споруджується	1800
Блу-Ридж	США	1990	1600
Реккун-Маунтин	США	1978	1600
Миньтан	Тайвань	1992	1600
Кайшадорська	Литва	1988	1600
Тамет III	Австралія	1972	1500
Самміт	США	Споруджується	1500
Чиотас-Піастра	Італія	1980	1330
Такасегава 1 и 3	Японія	1980	1280
Окутатараги	Японія	1975	1240
Тамахара	Японія	1982	1240
Ко-Труа-Пон I и II	Бельгія	1969, 1979	1237
Окуесино	Японія	1977	1200
Хелмс	США	1982	1200
Бленем-Гильбоа	США	1973	1200
Кастайк	США	1976	1200
Дракенсберг	ЮАР	1983	1200
Мюррей	Австралія	1989	1190
Синтоене	Японія	1972	1150
Вианден I и II	Люксембург	1964, 1973	1125
Имайчи	Японія	1986	1080
Гольдисталь	Німеччина	Побудована	1060
Маркерсбах	Німеччина	1979	1050
Лаго-Делио	Італія	1971	1040
Эдоло	Італія	1981	1040

Асинхронізовані турбогенератори. У енергосистемах України і Росії введені в експлуатацію асинхронізовані турбогенератори (АСТГ) потужністю 110 ÷ 320 МВт [30,34,36,40,41,46]. Перший АСТГ потужністю 200 МВт (АСТГ-200-2У3) виготовлений Харківським НВО «Електротяжмаш» і встановлений в 1986 р. на Бурштинській ГРЕС. В таблиці 1.2 приведені дані по асинхронізованим турбогенераторам, які експлуатуються в енергосистемах Росії та України

Таблиця 1.2 – Асинхронізовані турбогенератори, які експлуатуються в енергосистемах Росії та України

Тип	Потужність	Місце установки	Рік вводу в експлуатацію
АСТГ-200-2УЗ	200 МВт	Енергоблок №10, Бурштинська ГРЭС (Львовенерго, Україна)	1985
АСТГ-200-2УЗ	220 МВт	Енергоблок №9, Бурштинська ГРЭС (Львовенерго, Україна)	1991
ТЗФА-110-2УЗ	110 МВт	Енергоблок №8, ТЭЦ-22 Мосенерго	2003
ТЗФАУ-160-2УЗ	160 МВт	Енергоблок №3 (ПГУ-450), ТЭЦ-27 Мосенерго	2007
ТЗФАУ-160-2УЗ	160 МВт	Енергоблок №11 (ПГУ-450), ТЭЦ-21 Мосенерго	2008
ТЗФАУ-160-2УЗ	160 МВт	Енергоблок №4 (ПГУ-450), ТЭЦ-27 Мосенерго	2008
ТЗФСУ-320-2УЗ	320 МВт	Енергоблок №3, Каширська ГРЭС	2009

Наявність багатозафазної обмотки на роторі у поєднанні із спеціальною системою збудження забезпечує істотне розширення робочих режимів АСТГ. Крім розширення діаграми допустимих навантажень в синхронних режимах, забезпечується робота АСТГ в асинхронних режимах. При цьому як синхронні, такі асинхронні режими АСТГ забезпечують плавне регулювання реактивної потужності в широких межах, що сприятливо позначається на роботі електростанції з АСТГ і енергосистемах в цілому. Генерування електроенергії при наявності АСТГ в складі енергоблоків підвищує безпеку, надійність і ефективність роботи теплових і, особливо, атомних електростанцій [36,40,41].

Асинхронізовані компенсатори. В 2008 році виготовлений асинхронізований компенсатор (АСК) потужністю 100 МВАр. АСК виконано за типом турбогенератора з горизонтальним виконанням осі ротора. Частота обертання ротора 1500 обертів за хвилину. Номінальна лінійна напруга 20 кВ. Ведеться розробка проектів асинхронізованих компенсаторів потужністю 50 і 160 МВАр [41,46,47].

АСК неявнополюсного виконання відрізняються від синхронних компенсаторів (СК) наявністю додаткової обмотки збудження по поперечній осі ротора. Магніторухійна сила (МДС) цієї обмотки істотно менша МДС основної

обмотки збудження. МДС додаткової обмотки $\leq 6\%$ МДС основної обмотки збудження. Короткочасне форсування струму в поперечній обмотці дозволяє підняти ефективність роботи цієї обмотки в 2 рази. Це забезпечує високий рівень динамічної стійкості АСК в порівнянні з синхронним компенсатором.

Живлення обмоток забезпечується через 4 контактних кільця.

На відміну від статичних компенсаторів електромашинні компенсатори не вносять спотворень в криві струмів і напруг системи, покращують протікання динамічних процесів в мережі завдяки впливу обертових мас компенсатора. Електромашинні компенсатори дозволяють короткочасно збільшити до двократного номінального значення виробництво реактивної потужності в динамічних режимах при високій швидкодії зміни цієї потужності.

Номінальна потужність СК Q_N визначається величиною реактивної потужності, що тривало видається компенсатором. Граничне значення споживання реактивної потужності явнополюсних СК (без від'ємного збудження) $\approx 50\% Q_N$. В неявнополюсних СК з реверсивною системою збудження споживання реактивної потужності $\leq 80\text{--}85\% Q_N$. У неявнополюсних СК без реверсивного збудження ця величина менша. Тому до теперішнього час знайшли практичне застосування саме явнополюсні СК.

В неявнополюсному АСК величини видаваної і споживаної реактивної потужності однакові.

Основні переваги асинхронізованих компенсаторів над синхронними: підвищення діапазону регулювання споживаної реактивної потужності; короткочасна двократна відносно номінальної потужності видача (або споживання) реактивної потужності в електричну мережу в динамічних режимах; висока швидкодія при регулюванні реактивної потужності (напруги), що покращує характер протікання перехідних процесів в системі.

Регульований електропривод. В статті [38] «Регульований електропривод – ефективне енергозберігаюче устаткування» відмічається: «У світовій практиці регульований електропривод визнаний однією з найбільш ефективних енергозберіжних і ресурсозберіжних екологічно чистих технологій». У бі-

льшості технологічних систем енергетики, промисловості, комунального господарства і інших галузей встановлені електродвигуни з розрахунку на максимальну продуктивність устаткування. На долю таких електродвигунів доводиться близько 40 % електроенергії. Час пікового навантаження складає всього 10 ÷ 15 відсотків загального часу роботи устаткування. Електродвигуни, що працюють з постійною швидкістю обертання, споживають приблизно на 50 % більше електроенергії, яка потрібна для забезпечення оптимального технологічного процесу. В роботі проведений аналіз ефективності енергозбереження і ресурсозбереження при застосуванні регульованого електроприводу в основних галузях народного господарства.

Оснащення регульованим електроприводом всіх теплових енергоблоків одиничною потужністю від 150 до 300 МВт, встановлена потужність яких в Росії складає близько 55 000 МВт, забезпечить за рахунок зниження витрати електроенергії на власні потреби додатковий відпуск електроенергії споживачам від 3,9 до 4,8 млрд. кВт·год щорічно.

У нафтовидобувній промисловості застосування регульованого електроприводу в 3-4 рази підвищує довговічність устаткування, в 2-3 рази скорочує операції по заміні найбільш навантажених елементів і вузлів устаткування, що скорочує експлуатаційні витрати по нафтовидобутку.

Вельми значний енергозберігаючий ефект досягається від застосування регульованого електроприводу в насосних установках, що вимагають регулювання продуктивності при підтримці постійного тиску у споживача. Потужність, споживана насосними установками, знижується пропорційно зміні частоти обертання в третьому ступені.

Ресурсозбережний ефект електроприводу визначається регулюючою здатністю, а також забезпеченням плавних пусків і зупинок насосів, вентиляторів і інших механізмів.

Дослідженню режимів роботи насосних установок і вибору електроприводу приділяється багато уваги в літературі. Разом з тим недостатньо освітлено питання паралельної роботи регульованих і нерегульованих електроприводів в

порівняно простих схемах насосних станцій окремих підприємств. Існує думка, що заміна одного (або декількох) нерегульованого приводу регульованим електроприводом дозволить застосувати систему автоматичного управління (САУ) насосної станції, істотно вплинути на весь технологічний процес.

В роботі [19] проводиться аналіз роботи автономної насосної станції з п'ятьма паралельно працюючими регульованими і нерегульованими насосами, видані рекомендації по застосуванню високовольтних машин подвійного живлення як регульований електропривод. Номінальна потужність одного електроприводу $P_N = 630$ кВт, число регульованих агрегатів $k = 1 \div 3$.

В таблицях 1.3 і 1.4 приведені параметри регульованих насосів і діапазон зміни сумарної подачі насосної станції при зміні подачі насосів до максимальної (таблиця 1.3) і при обмеженні потужності регульованого двигуна величиною $P_{\max} = P_N$ (таблиця 1.4) при різній кількості регульованих насосів ($k = 1 \div 3$): $n_{\min} \div n_{\max}$, $P_{\min} \div P_{\max}$ – діапазони зміни швидкості обертання і потужності регульованих електроприводів; $Q_{\min} \div Q_{\max}$ – діапазони зміни подачі одного регульованого насоса; $Q_{c\min} \div Q_{c\max}$ – діапазони зміни подачі насосної станції.

Таблиця 1.3 – Параметри регульованих насосів і діапазони зміни сумарної подачі насосної станції при зміні подачі регульованих насосів до максимальної

Число насосів		$n_{\min} \div n_{\max}$	$P_{\min} \div P_{\max}$	$Q_{\min} \div Q_{\max}$	$Q_{c\min} \div Q_{c\max}$
k	m	об/хв	кВт	м ³ /год	м ³ /год
1	4	612 ÷ 780	189 ÷ 704	0 ÷ 4000	14930 ÷ 16240
2	3	605 ÷ 789	240 ÷ 723	1150 ÷ 4000	14300 ÷ 16570
3	2	633 ÷ 801	328 ÷ 751	2100 ÷ 4000	14300 ÷ 17050

Таблиця 1.4 – Параметри регульованих насосів і діапазони зміни сумарної подачі насосній станції при $P_{\max} = P_N$

Число насосів		$n_{\min} \div n_{\max}$	$P_{\min} \div P_{\max}$	$Q_{\min} \div Q_{\max}$	$Q_{\text{сmin}} \div Q_{\text{сmax}}$
к	м	об/хв	кВт	м ³ /год	м ³ /год
1	4	612 ÷ 757	189 ÷ 630	0 ÷ 3640	14930 ÷ 16130
2	3	605 ÷ 758	240 ÷ 630	1150 ÷ 3590	14300 ÷ 16290
3	2	633 ÷ 760	328 ÷ 630	2100 ÷ 3540	14300 ÷ 16470

Як видно з таблиць, діапазон зміни сумарної подачі насосної станції складає всього 18 – 30 % від сумарної граничної подачі регульованих насосів. Діапазон зміни сумарної подачі насосній станції може бути збільшений до 100% від сумарної граничної подачі регульованих насосів при роботі регульованих і нерегульованих насосів на окремі трубопроводи. Таким чином в кожному конкретному випадку потрібний ретельний аналіз роботи насосної станції з паралельно працюючими регульованими і нерегульованими електроприводами. Спрощений підхід до вирішення проблеми може привести до необґрунтованих замовлень на нове технологічне устаткування і, кінець-кінцем, уповільнити впровадження регульованого електроприводу.

В зарубіжній практиці економічний ефект від підвищення надійності, терміну служби і міжремонтного ресурсу устаткування (насосних і вентиляційних агрегатів, арматури і комутаційної електротехнічної апаратури) зарахунок «щадних» режимів його роботи оцінюється вище за економічний ефект від економії електроенергії [38].

Перспективи впровадження безконтактних асинхронізованих машин

Як було вказано вище в даний час у всьому світі широко впроваджуються АСМ великої потужності. У всіх АСМ роторні двофазні або трифазні обмотки підключені до перетворювача частоти (ПЧ) через контактні кільця. Разом з тим синхронні машини в основному виконуються в безконтактному виконанні, що обумовлено необхідністю підвищення надійності їх роботи. Розробка безконтактних асинхронізованих машин (БАСМ) з низькими та інфранизькими частота-

ми збудження, які можуть застосовуватися як генератори потужних і автономних електроенергетичних систем, регульований електропривод, генератори-двигуни гідроакumuлюючих станцій, компенсатори, електромеханічні каскади гнучкого зв'язку енергосистем, – одне із важливих завдань енергетики.

При розробці безконтактних асинхронізованих машин (БАСМ) дотримується основний принцип електромеханотроніки – комплексний підхід до створення електромашинно-вентильного перетворювача (ЕМВП), що включає електромашинний збудник, обертовий перетворювач частоти (ПЧ), пристрої автоматичного регулювання, контролю і захисту.

Дослідження вчених НТУУ «КПІ» показали можливість створення ЕМВП БАСМ на базі електромашинних збудників і безпосередніх перетворювачів частоти (БПЧ) [1÷5,11,13÷15,17,18,20,22,23].

БПЧ розробляються при циклічних алгоритмах управління тиристорами, що обумовлено необхідністю застосування простих і надійних пристроїв передачі сигналів управління на обертову частину.

Найпростіше циклічний алгоритм управління реалізується в БПЧ з штучною комутацією (БПЧШ) при обмеженому числі повністю керованих ключів. В роботі [34] розглянута система збудження безконтактного асинхронізованого турбегенератора (БАСТГ) на базі БПЧШ. Проте, дослідження, проведені в роботі [10], показали: БПЧШ не можуть застосовуватися в системах збудження БАСМ у зв'язку з великими комутаційними перенапруженнями і втратами в перетворювачах. Втрати в захисних ланках вентилів БПЧШ можуть скласти до 20 % і більше від потужності навантаження перетворювача.

Враховуючи вищесказане, основна увага дослідників направлена на розробку БПЧ з природною комутацією (БПЧП).

Високою якістю форми вихідної напруги відрізняються системи збудження з каскадними збудниками і БПЧП з модульованою вхідною напругою (БПЧПМ) при застосуванні комбінованого з'єднання обмоток джерела живлення і комбінованого закону управління тиристорами.

Найкращими показниками відрізняються БПЧПМ з мостовими схемами перетворення, в яких застосовується комбінований закон управління тиристорами по струму навантаження і частоті заповнення, комбіноване потенційне з'єднання обмоток джерела і навантаження [2,3]. Проте такі БПЧПМ не працюють при застосуванні трифазних джерел живлення. Це пов'язано з наявністю вищих гармонік в струмах навантаження ПЧ з непарним числом фаз джерела живлення [4,5,20]. Тому актуальною є розробка багатофазно-трифазних мостовими БПЧПМ з парним числом фаз джерела на одну фазу навантаження. Такі БПЧПМ відрізняються високою якістю форми кривих напруги та струму навантаження [11,12,15,19,20,22,23], високим використанням збудників. В роботі [33] відмічається, що застосування багатофазних збудників в потужних безконтактних синхронних машинах (БСМ) приводить до поліпшення якості форми вихідної напруги і підвищення швидкодії збудників. Ці положення справедливі і для збудників БАСТГ. Тому розробка багатофазних ЕМВП БАСМ на базі каскадних збудників і БПЧПМ є актуальною.

Застосування БАСМ особливо перспективно при порівняно невеликих величинах ковзання. Перспективне застосування БАСМ як генератор-двигунів на ГАЕС. Можливі об'єкти їх впровадження приведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Асинхронізовані генератор-двигуни на ГАЕС

ГАЕС	Рік пуску	Потужність в реж. двигуна, МВт	Потужність в реж. генератора, МВт	Швидкість обертання, об/хв	Виробник
Ягасава-2	1990	53-82	85	130-156	Toshiba
Таками-2	1993	54-140	140	200-254	Mitsubishi
Окавачи-2	1993	331-397	385	330-390	Hitachi
Шиобара-3	1995	200-380	360	356-394	Toshiba
Окавачи-4	1995	240-400	385	330-390	-
Ягасава-3	1996	53-82	85	130-156	Toshiba
Оукиотсу	1998	230-340	345	408-450	Toshiba
Голдисталь	2003	300-351,6	285	280,7-346	VA Tech
Казуногава	2005	-	500	500 синхр.	-
Омаругава	2005	230-330	340	578-624	Mitsubishi

В даний час для стабілізації параметрів енергосистем в основному застосовуються безконтактні синхронні компенсатори (БСК). Асинхронізовані компенсатори виготовляються з контактними кільцями і працюють при величині ковзання $s = 0$ [45-47]. В роботах [18,19] показана принципова можливість побудови безконтактних АСК (БАСК) з ЕМВП на базі каскадних збудників та БПЧПМ.

В [18] вказано, що в пристроях зв'язку енергосистем з двома механічно зв'язаними БАСМ рекомендується застосувати один збудник на базі мостового БПЧПМ з двома трифазними обмотками навантаження, - обмотками збудження асинхронізованих машин. При цьому регулювання амплітуди струму збудження доцільно здійснювати по струму збудження збудника і по куту управління тиристорами.

Не дивлячись на велику потребу в Україні дуже низькими темпами впроваджується високовольтний регульований електропривод. Це пов'язано з тим, що в основному розробка регульованого електроприводу ведеться в напрямі поєднання перетворювача частоти (ПЧ) в живлячій мережі і асинхронного двигуна (АД) з к.з. ротором. Проте, подібний напрям має істотний недолік: ПЧ по-

винні мати щонайменше таку ж потужність, як і сама електрична машина.

Діапазон регулювання швидкості обертання електроприводів насосних і вентиляційних установок складає $\approx 15 \div 20$ % від номінальної швидкості. Істотно знижується потужність ПЧ, що обумовлює зниження вартості агрегату в цілому. Тому таке впровадження як регульований електропривод потужних насосних і вентиляційних установок високовольтних АСМ з перетворювачами в роторній ланці є перспективним [8,16,25,38].

Впровадження безконтактних асинхронізованих двигунів (БАСД) дещо стримувалось відсутністю пускових пристроїв з високими технічними показниками. На даний час розроблені безконтактні пускові пристрої АСМ з противключенням обмоток ротора, які відрізняються простотою конструкції і малою вартістю [8,21], що обумовлює широке впровадження АСМ і БАСМ.

В таблиці 1.6 порівняно вартість регульованих електроприводів (включаючи безконтактні асинхронізовані двигуни - АСД) водопостачання потужністю 630 кВт при $n_N = 750$ об/хв. В таблиці 1.7 – термін окупності інвестицій у впровадження високовольтного регульованого електроприводу (РЕП) потужністю 800 кВт. Розрахунки виконані співробітниками фірми «Transresh» (Німеччина). Вартість відомих варіантів РЕП взята по техніко-комерційним пропозиціям іноземних компаній, що працюють в Україні [21].

Таблиця 1.6 – Порівняння вартості РЕП потужністю 630 кВт, $n_N = 750$ об/хв

Технічне рішення		Вартість, (EUR)
1	Безконтактний АСД	80 000
2	АСД з контактними кільцями	100 000
3	РЕП на базі ПЧ на 0,4 кВ, наявного АД з к.з. ротором ($U_1 = 6$ кВ) і двох трансформаторів на вході и виході ПЧ	114 000
4	РЕП на базі ПЧ ($U_2=0,4$ кВ), мережевого трансформатору і нового АД з к.з. ротором	117 000
5	РЕП на базі під синхронного каскаду перетворювача і нового АД з фазним ротором на 6 кВ	120 000
6	РЕП на базі ПЧ с $U_2= 3,3$ кВ і нового АД з к.з. ротором	160 000
7	РЕП на базі ПЧ с $U_2= 6$ кВ і наявним двигуном	220 000

Таблиця 1.7 – Розрахунок строку окупності інвестицій

	Найменування	Одиниця	Значення
1	Встановлена потужність	кВА	800
2	Середня потужність	%	60
3	Ціна за кВт*год електроенергії	EUR /кВт*год	0,025
4	Тривалість роботи на рік	год	7 000
5	Споживання електроенергії РЕП у порівнянні з нерегульованим електроприводом (НРЕП)	%	60
6	Вартість електроенергії РЕП	EUR	50 400
7	Вартість електроенергії НРЕП	EUR	84 000
8	Економія електроенергії НРЕП	EUR	33 600
9	Загальна вартість інвестицій	EUR	60 000
9.1	Видатки на інвестиції РЕП	EUR	70 000
9.2	Прибуток від продажу старого електродвигуна	EUR	10 000
	Строк окупності	Рік	1,79

Наприклад, значна частина вентиляційних установок Донбасу працює з вихідною потужністю близько 40 – 60 %. Частина потужності втрачається на «засувках». При заміні високовольтних синхронних двигунів (СД) на безконтактні асинхронізовані двигуни (БАСД) досягається економічний ефект за рахунок: зменшення споживання електроенергії; поліпшення технологічного режиму; збільшення терміну служби агрегатів (зменшення пускових струмів двигунів). При серійному виробництві вартість нового високовольтного БАСД менше загальної вартості високовольтного статичного перетворювача частоти для існуючого синхронного двигуна приблизно в два рази. Термін окупності капіталовкладень менше 1 року [21].

Враховуючи, що експериментальні дослідження потужних високовольтних електричних машин [33] утруднені і є дорогими, актуальними є розробка і дослідження математичних моделей БАСМ з багатофазними збудниками. Велика увага приділяється теоретичним питанням, пов'язаним з розробкою ЕМВП БАСМ.

Велика увага вчених НТУУ «КПІ» приділяється розробці безконтактних асинхронізованих турбогенераторів (БАСТГ), двигунів, компенсаторів [4,5,8,9,11,12,14,15,17-23] та інше.

На кафедрі електромеханіки при розробці ЕМВП БАСМ застосовуються математичні моделі в системі схемотехнічного моделювання Micro Cap [7,10,13,14,18-20,] та спеціальні математичні моделі в системі Matlab [9,11,12,15,16,22,23]. Застосування різних моделей при вирішенні однієї і тієї ж задачі істотно підвищує вірогідність отримання коректних результатів, підтверджує правомірність прийнятих допущень, обґрунтовує вибір нових, простих і достатньо точних моделей і методів, адаптованих до вирішення складних завдань. Важливим є дослідження ЕМВП з урахуванням реальних параметрів електромашинних збудників, вентилів перетворювачів частоти, що впливають на комутаційні перенапруження, на можливість виникнення резонансних явищ, тобто на надійність машини в цілому, на реальну перспективу створення нових типів ЕМВП БАСМ. Велика увага приділялася питанням створення безконтактних пристроїв передачі сигналів управління на обертову частину.

В роботі [23] приведена спеціалізована математична модель по розрахунку характеристики БАСТГ з обертним багатозазно-трифазним БПЧПМ з урахуванням параметрів масиву ротора генератора. Достовірність результатів досліджень спеціалізованої моделі БАСТГ підтверджена їх практичним збігом з результатами досліджень моделей АСТГ з контактними кільцями по схемі заміщення.

Приведені в [18] результати досліджень фізичних моделей ЕМВП БАСМ підтвердили теоретичні передумови.

Принципово можливе створення систем збудження БАСМ на базі одномашинного збудника і БПЧП при циклічному алгоритмі управління [11,12,14,18,22]. Математична модель БАСМ з каскадним збудником і БПЧПМ дозволяє досліджувати БАСМ з одномашинними збудниками.

ЛІТЕРАТУРА

1. А.С. СССР №1104639. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Працюк В.В. Способ управления тиристорным преобразователем частоты. Оpubл. в БИ, №27, 1984.
2. А.С. СССР № 1206922. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Преобразователь частоты. Бюл. № 3, 1986.
3. А. С. SU 1339821. Н 02 М 5 / 42. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты., Оpubл. 23.09.87, Бюл. № 35.
4. Галиновский А.М. Электромашинновентильные модулированные преобразователи в бесконтактных генераторах стабильной частоты // Технічна електродінаміка, Спец. вип. 2, т.2, Силовая электроника и энергоэффективность, Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 1998. – С. 61-65.
5. Галиновский А.М., Васылив К.Н., Ленская Е.А. Исследование бесконтактного асинхронизированного генератора с модулированным возбудителем. Вісник НТУ «ХПІ». 2001 - №16. – с. 41 – 46.
6. Галиновский А.М., Ленская Е. А. Многофазные синхронные возбудители в бесконтактных системах возбуждения синхронных машин. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України, №1, 2003.
7. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя, Технічна електродинаміка, №4, 2005, стр. 43-50.
8. Галиновский А.М., Анпилогов Н.Г., Ленская Е.А. Пуск бесконтактного асинхронизированного двигателя по методу противовключения обмоток ротора. Сб. научных трудов ДонГТУ, Алчевск, 2006.
9. Галиновский А.М., Бобер В.А., Кузьминский Е.В., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Многофазный вентильный генератор автономной ветроэнергетической установки.//Праці Інституту електродинаміки НАН України – 2006, Спец. вип., с. 152 - 156.

10. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Исследование моделей электромашинно-вентильных преобразователей с ограниченным числом полностью управляемых вентилях // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 22-29.

11. Галиновский А.М., Бобер В.А., Ленская Е.А., Особенности построения и расчета вращающихся многофазных преобразователей частоты бесконтактных асинхронизированных машин. // Энергетика: економіка, технологія, екологія.-2007,-№1. - с. 45 -57.

12. Галиновский А.М., Бобер В.А. Математическая модель бесконтактной асинхронизированной машины // Гидроенергетика України. – 2008. – № 4. – С. 21–27.

13. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Коваленко С.В., Ленская Е.А. Электрические и эквивалентные схемы, исследование работы трехфазно-однофазных электромашинно-вентильных преобразователей с модулированным напряжением. Вісник НТУ «ХП». – 2008. - №45, с. 17 – 35.

14. Галиновский А.М., Кузьминский Е.В., Ленская Е.А. Электромашинно-вентильные преобразователи бесконтактных асинхронизированных машин с синхронными возбудителями. Вісник Кременчуцького ДПУ ім. Михайла Остроградського.– 2008.–Вип. 3, ч. 2, с. 46 – 50.

15. Бобер В.А., Галиновский А.М. Математическая модель бесконтактной асинхронизированной машины с каскадным возбудителем в режимах генератора и двигателя // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2009. – Вип. 83. – С. 95-104.

16. Галиновский А.М., Бобер В.А., Троян А.И., Ленская Е.А. Режимы работы водонасосной станции и выбор регулируемого электропривода. Гірничя електромеханіка та автоматика. Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. -2009. – Вип.82.- С.124-134.

17. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашинно-вентильные преобразователи машин двойного питания (Ч. 1) // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. № 84. – С. 218-

18. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашинно-вентильные преобразователи машин двойного питания (Ч. 2) // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2010. – Вип № 85, С. 159-169.

19. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Пастух Д.И. Асинхронизированный компенсатор. Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики – Київ: «Політехніка», 2010. – с. 253-255.

20. Сенько В.И., Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазно-трехфазные мостовые преобразователи частоты бесконтактных асинхронизированных машин // Вісник Кременчуцького держ. університету ім. Михайла Остроградського .№4 / 2010 (63), ч.3, – С. 69-73.

21. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Энергосберегающие электрические машины. Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб., 2011, №86, с. - 105-114.

22. Галиновский А.М., Бобер В.А., Пастух Д.И. Исследование математической модели бесконтактного асинхронизированного генератора при комбинированном управлении возбуждением. Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенерготехіки та автоматики. – Київ: «Політехніка», 2011. – 600 с.

23. Бобер В.А., Галиновский А.М., Саратов В.А. Разработка и исследование математической модели бесконтактного асинхронизированного турбогенератора с многофазным каскадным возбудителем// Праці Інституту електродинаміки НАН України. Випуск № 31, 2012, - с. 49-58.

24. Ботвинник М.М. Асинхронизированная синхронная машина, - М. «Госэнергоиздат», 1960. – 380с.

25. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемые машины переменного тока. – М. «Наука», 1960. – 230с.

26. Жимерин Д. Г., Никитин П. З., Кильдишев В. С., Ковальков Г.А. Мно-

гофазный бесщеточный возбудитель мощного турбогенератора. - Электричество. 1977. № 8, с.29-34

27. R.Ramakumar. Wind electrical conversion utilizing field modulated generator systems. – “Solar Energy”, v.20, №2, 1978, p. 109 – 117.

28. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: «Энергия», 1979. – 200 с.

29. Алиев И.И. Разработка асинхронной каскадной машины для гибкой связи энергосистем. М.: Высш. шк., 1984. – 219с.

30. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: «Энергоатомиздат», 1984. –192 с.

31. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. – Львов: Вища шк., 1986. – 164 с.

32. Кильдишев В.С., Ковальков Г.А., Кузьмин В.В., Савельев Ю.Е. Тиристорные бесщеточные возбудители мощных синхронных машин. - Электрические станции, 1987, №11, с. 61-67.

33. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин // Л: Наука. – 1988. – 322 с.

34. А. С. SU 15347445. Н 02 Р 9 / 14. Савельев Ю.Е., Быков С.В., Зозулин Ю.В., Козлов Ю.А. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины. Опубл. 08.01.90, Бюл. № 1.

35. А. С. SU 2020689. H02J3/06. Цгоев Р.С. Асинхронизированный электромеханический преобразователь частоты. Опубл. 30.09.1994, Бюл. № 2.

36. Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные генераторы: состояние, проблемы, перспективы. // Электричество, 1994, №3, с. 44-49.

37. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap6, - М. “СОЛОН”, М.; Горячая линия- Телеком, 2001,- 344 с.

38. Сахарнов Ю.В. Регулируемый электропривод эффективное энергосберегающее оборудование // Вопросы регулирования ТЭК. Регионы и Федерация. 2001. № 1.

39. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВHV, 2005. – 512 с.: ил.
40. Шакарян Ю.Г., Бобылев А.В. Внедрение асинхронизированного турбогенератора на ТЭЦ-22 ОАО "Мосэнерго". Достоинства асинхронизированного генератора, его внешний вид, специфика эксплуатации. 2005 г., <http://www.rao-ees.elektra.ru/ru/news/gazeta/151-2004/show.cgi?novo.htm>
41. Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А. Внедрение асинхронизированных генераторов и компенсаторов на объектах единой энергетической системы // Энергетик. – 2005. – Вип. № 6. – С. 12-19.
42. Клиначёв Н.В. Асинхронизированный синхронный генератор. 2006 г., http://model.exponenta.ru/k2/Jigrein/md_052.htm
43. Бобер В.А. Математическая модель электромеханических систем. Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізація. Зб. наук. праць VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених у м. Кременчук, КДПУ, 2008. – С. 58 - 59.
44. Абубакиров Ш.И. Опыт и перспективы использования асинхронизированных гидрогенераторов в проектах ОАО «Институт Гидропроект» // Гидротехника. – 2010, – №2 (19), – С. 6-11.
45. Антонюк О.В., Пинчук Н.Д., Кади-Оглы И.А. и др. Асинхронизированные неявнополюсные компенсаторы. 15 января 2010 г., <http://neftegaz.ru/science/view/600>
46. ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС». Асинхронизированные машины: генераторы, компенсаторы. 2012 г., http://www.ntc-power.ru/innovative_projects/asynchronized_machines_generators_compensators/
47. Антонюк О.В., Пинчук Н.Д. Асинхронизированные неявнополюсные компенсаторы. Наука и технологии // Приборостроение. – 15.01.2010 г.