УДК 621.313.322

Г.Г.Счастливий, академік НАН України, **О.І.Титко**, докт.техн.наук (Ін-т електродинаміки НАН України, Київ)

Підвищення ефективності та надійності електромеханічного перетворення енергії

Наведено короткий огляд досягнень однієї з найбільш авторитетних в країні наукових шкіл у галузі електромеханіки. Розвиток нових ідей, проведення теоретичних і прикладних досліджень пов'язано з поетапним ростом кадрів та потребами економіки. Накреслено перспективи подальших досліджень у цій галузі науки.

Приведен краткий обзор достижений одной из наиболее авторитетных в стране научных школ в области электромеханики. Развитие новых идей, проведение теоретических и прикладных исследований связываются с поэтапным ростом кадров и потребностями экономики. Намечены перспективы дальнейших исследований в данной отрасли науки.

Наукові дослідження в галузі електромеханіки розвиваються в Інституті електродинаміки понад п'ятдесят років. Потреби практики, які визначили високі темпи виробництва електроенергії на теплових, атомних і гідравлічних електростанціях, призвели до росту одиничної потужності генераторів: з 1950 по 1980 рік одинична потужність турбогенераторів, що випускаються серійно, зросла з 100 до 1000 МВт, тобто в 10 разів! Відповідно високими темпами розвивалися роботи з електрифікації всіх галузей економіки, що обумовило потреби розширення електропривода, а також генераторів для автономних енергоустановок.

Треба було створити серії електродвигунів широкого діапазону потужностей, які працюють у складних умовах навколишнього середовища, що реалізують складні закони руху й можуть агрегувати з різноманітними механізмами (конвейєри, бортові агрегати та ін.). Аналогічні вимоги пред'являлися й до створення генераторів для автономних енергоустановок.

Активно розвиваються також роботи зі створення електромеханічних систем із двигунами, що реалізують складні закони руху, у т.ч. лінійні, крокові, поворотні, які застосовуються на транспорті, робототехніці й ін.

Загальною проблемою при створенні всіх типів електромеханічних систем є проблема підвищення їхньої ефективності, яка обумовлена показниками якості виконання основних функцій, економічністю, масогабаритними показниками і надійністю. При цьому, з огляду на тенденції розвитку електроенергетики й електрифікації у світовому масштабі, показники надійності в більшості практичних реалізацій електромеханічних систем виходять на перше місце. Це обумовлюється вимогами забезпечення якості продукції, які визначають її конкурентоспроможність на ринку.

Розвиток наукових досліджень в інституті із проблем підвищення ефективності й надійності процесів електромеханічного перетворення енергії здійснювалося постійно на основі ініціативи вчених, що висували передові ідеї в процесі виникаючих у практиці завдань. Цьому сприяв постійний розвиток творчого співробітництва з виробництвом.

Конкретизуємо вищесказане найбільш значимими прикладами досягнень у розвитку наукового напрямку, виділивши три етапи розвитку наукової школи електромеханіки в Інституті електродинаміки Національної Академії наук України.

1. Етап становлення наукової школи, що охоплює приблизно шістнадцять років: 1954—1970 роки.

2. Етап інтенсивного розвитку досліджень і розробок по основних напрямках електромеханіки, що тривав приблизно двадцять років: 1971—1990 роки.

3. Етап перебудови наукових досліджень, напрямки яких формувалися з урахуванням потреб України як незалежної держави: 1991 — 2007 роки.

У завершенні характеристики робіт на цьому етапі оцінимо потенціал наукової школи на даний момент і визначимо перелік деяких актуальних завдань, рішення яких буде потрібно для економіки України.

Становлення наукової школи електромеханіки почалося із приходом в інститут в 1954 році доктора технічних наук, професора І. М. Постнікова. До

© Счастливий Г.Г., Титко О.І., 2007

цього часу І.М.Постніков (з 1950) завідував кафедрою електричних машин у Київському політехнічному інституті, а це сприяло відбору в наш інститут найбільш здібних випускників КПІ.

Про творця однієї із найбільших і найавторитетніших наукових шкіл в галузі електромеханіки в Україні Івана Матвійовича Постнікова, чл.-кореспондента АН УРСР і двічі Лауреата Державної премії УРСР у галузі науки й техніки доречно дати деякі відомості з його наукової біографії.

І.М.Постніков протягом близько 20 років працював у Ленінградському політехнічному інституті під безпосереднім керівництвом і в тісному науковому співробітництві з академіком М.П.Костенко. Читання лекцій, проведення дослідницьких робіт тісно поєднувалося з потребами промисловості. Співробітництво із провідними вченими й інженерами заводу "Електросила" Р.А.Лютером, А.С. Єремєєвим, В.В.Тітовим, Є.Г.Комаром та ін. визначило наукові інтереси І.М.Постнікова в галузі турбо- і гідрогенераторобудування, створення електродвигунів змінного і постійного струмів, спеціальних електротехнічних комплексів. У співробітництві з провідними вченими-електротехніками Л.Р.Нейманом і В.Ф.Міткевичем вирішувалися складні завдання створення електричних машин з масивним ротором для спеціальних цілей. Великий комплекс досліджень щодо нагрівання потужних турбо- і гідрогенераторів І.М.Постніков проводив у 1936—1941 рр. на електростанціях Ленеенерго й у роки війни на гідроелектростанціях Узбекенерго. Висока творча активність і глибокі знання теорії електричних машин, характеру електромагнітних процесів і теплопередачі в активній зоні великих машин дозволили І.М.Постнікову узагальнити ці роботи в докторській дисертації, яка була присвячена нагріванню великих синхронних генераторів та успішно завершена в 1943 році.

Відзначимо і глибоке розуміння І.М.Постніковим комплексу питань проектування електричних машин різних типів в узгодженні з економічними питаннями й надійністю.

Завідування кафедрою в КПІ в найкоротший строк дозволило І.М.Постнікову розгорнути наукові дослідження з багатьох актуальних проблем електромеханіки, що, у свою чергу, дозволило активно готувати на кафедрі КПІ наукові кадри й висококваліфікованих інженерів для промисловості та для створення школи електромеханіки в Інституті електродинаміки АН УРСР. Науковим і практичним керівництвом для вирішення такого багатопланового завдання стали фундаментальні праці І.М.Постнікова по проектуванню, загальній теорії й режимах роботи електричних машин [1, 2, 3].

Теорія електромагнітних і електромеханічних процесів і аналіз динаміки електричних машин (І.М.Постніков) оцінена Державною премією УРСР за кращий підручник для ВУЗів.

На даному початковому етапі досліджень в галузі електромеханіки можна виділити три основні проблеми, що одержали найбільший розвиток та досліджуються і нині. Це проблема створення однофазних конденсаторних електродвигунів, проблема нагрівання й охолодження електродвигунів і проблема надійності кінцевих зон потужних турбогенераторів. Крім зазначених, у цей період у пошуковому плані проводилися дослідження деяких інших питань електромеханіки.

Проблема створення однофазних двигунів постала в інституті у зв'язку із загальнодержавною програмою розвитку сільськогосподарського виробництва й, зокрема, створення електротрактора.

У рамках створеної в інституті лабораторії електрифікації сільського господарства під керівництвом І.М.Постнікова проведено фундаментальні теоретичні й прикладні дослідження з комплексної проблеми несиметричних асинхронних двигунів, включаючи процеси в однофазних полюсоперемикаючих двигунах, дослідження параметрів і характеристик численних схем трифазно-однофазних двигунів, а також розрахунки нагрівання (О.І.Адаменко, О.О.Войтех, Б.О.Нікітін та ін.). Опубліковано ряд фундаментальних теоретичних робіт із цієї проблеми [5, 6, 7]. Однак до кінця 50-х років цей напрямок зазнав змін, тому що ідея електротрактора виявилася передчасною, заводи електропромисловості не підключилися до виготовлення однофазних двигунів потужністю в десятки й сотні кіловат, і роботи було переорієнтовано в прикладному порядку на створення трифазно-однофазних двигунів малої потужності для побутової техніки й комунального господарства.

Роботи з дослідження нагрівання несиметричних двигунів було переорієнтовано у зв'язку із запитами промисловості на створення нових серій асинхронних двигунів закритого виконання потужністю до 400 кВт. До цього часу було завершено дослідження нагрівання й розроблено теоретичні основи розрахунку нагрівання несиметричних двигунів на базі застосування чисельного моделювання рівнянь теплопередачі в областях активної зони двигуна в стаціонарних і нестаціонарних режимах. Загальні методи розв'язку таких рівнянь у ці роки активно розроблялися за кордоном (у США), а також у нашій країні. Найбільш прийнятним для наших цілей був метод електричних аналогій для моделювання польових рівнянь [11]. Розроблено моделі чисельного аналізу теплопередачі в обмотках і магнітопроводі двигунів на основі кінцево-різницевої апроксимації рівнянь Фур'є-Пуассона. Для забезпечення точності й адекватності в розв'язках рівнянь для внутрішніх областей машини розроблено новий метод вимірювання локальних характеристик конвективного теплообміну безпосередньо на дослідних двигунах нових різноманітних конструкцій. Метод кінцевих різниць при розв'язанні задач теплопередачі для активних частин електромашин був найбільш прийнятним при адаптації практичних моделей до елементарних балансів, безпосередньо перетвореним

до еквівалентних теплових схем [10].

Практичні методики розрахунків нагрівання електромашин, засновані на одно- і двомірних рівняннях теплопередачі, проводилися на розробленому в інституті електромодульованому пристрої типу ЕТМ, що дозволяло розв'язувати до 35 рівнянь теплових схем для дослідження стаціонарних і нестаціонарних режимів нагрівання й охолодження. Застосування на моделі ЕТМ алгоритму Ліб-мана при моделюванні рівнянь нестаціонарної теплопровідності [11] дозволило на *R*-сітках ураховувати в розв'язках характеристики нелінійності й зміну інтенсивності конвективного теплообміну при регулюванні швидкості обертання, а також в аварійних ситуаціях.

В 60-і роки, коли застосування цифрових ЕОМ було дуже обмеженим, пристрій типу ЕТМ використовувався декількома галузевими НДІ й КБ заводів як робочі засоби при проектуванні електродвигунів різних потужностей, типів і конструкцій загального й спеціального призначення, включаючи вибухобезпечні двигуни для шахтного електропривода, хімічного виробництва й морського флоту. Надалі ці методи використовувалися при розрахунках різних електричних машин на базі використання універсальних ЦОМ, а також персональних комп'ютерів.

На початку 60-х років в інституті почалися дослідження, які були пов'язані із проблемою надійності потужних турбогенераторів. Загальносвітова тенденція швидкого розвитку електроенергетики поєднувалася в ці роки з різким збільшенням одиничних потужностей турбогенераторів, характерною рисою якого було збільшення електромагнітних навантажень, що досягаються за рахунок інтенсифікації охолодження активної зони при габаритах, які практично мало змінюються.

Уявне підвищення ефективності конструкцій генераторів зростаючої потужності (збільшення ККД, покращення масогабаритних показників), а також ефективність спорудження електростанцій увійшли в серйозне протиріччя з різко погіршеними показниками надійності (зменшення коефіцієнта готовності до 0,7—0,8 при необхідних не нижче 0,99, а також показника наробітку на відмову в окремих випадках до 4000—5000 годин при вимогах не менше 12000 годин).

Основною проблемою стало збільшення втрат і нагрівання в елементах кінцевих зон генераторів. Гострота проблеми виявилася в період експлуатації турбогенераторів потужністю 200 і 300 МВт. Заводи електропромисловості вже приступили до серійного виробництва генераторів таких потужностей, а невивченість електромагнітних полів і нагрівання частин кінцевих зон генераторів, що призводять до нагрівання окремих відповідальних вузлів (воднево-масляні ущільнення, що пресують вузли магнітопроводу та ін.) до декількох сотень градусів, призводили до частих відмов генераторів і в ряді випадків до необхідності зниження навантажувальної спроможності генераторів.

Галузеві інститути не мали методів розрахунку цих явищ, заводи випускали генератори з конструктивними недоліками.

У цей критичний період за ініціативою головного конструктора заводу "Електроважмаш" Станіславського Л.Я. й професора І.М.Постнікова в інституті розгорнулися комплексні дослідження із цієї проблеми. Висунуті Постніковим ідеї з розрахунку електромагнітних полів і нагрівання в кінцевих частинах потужних турбогенераторів були активно підтримані фахівцями заводу й працівниками ряду електростанцій (Придніпровська, Бурштинська ТЕС та ін.).

Колектив молодих учених інституту (Г.П.Єзовіт, В.М.Ніколаєв, В.М.Асанбаєв, А.С.Карацуба, А.А.Бабяк, А.М.Кравченко й ін.) за активної участі фахівців заводу "Електроважмаш" (В.С.Кильдишев, І.Я.Черемисов, Б.В.Співак, П.Я.Карташевський та ін.) активно проводили дослідження невідомих фізичних явищ і процесів.

У роботі брали участь також ряд молодих учених Інституту математики АН УРСР (Л.П.Нижник, А.А.Березовський і ін.).

Характерною рисою досліджень по даній проблемі є комплексний підхід до її вирішення, при якому розробка теорії, методів математичного моделювання полів і розробка методик інженерних розрахунків і шляхів удосконалювання конструкцій взаємодоповнювались вивченням фізичних полів шляхом проведення натурних експериментів на виготовлених генераторах, а також пов'язаних з ними експериментальними дослідженнями на масштабних моделях кінцевих зон турбогенераторів 300 і 500 МВт, виготовлених на заводі по розробці вчених інституту. Одним із прикладів такого зв'язку може служити розробка методів розрахунку полів і втрат у деталях кінцевої частини за ідеєю І.М.Постнікова, в якій запропоновано застосувати метод питомих параметрів для класичної системи "струмовий шар з полем, що біжить, — провідний або шихтований масив" [4]. Проведення розрахунків по такій моделі визначає усереднені в розрахунковій області параметри електромагнітного поля й питомі поверхневі втрати, а фізичний експеримент на моделі або генераторі на основі вимірювання складових магнітного й електричного полів дозволяє приблизно розраховувати вихрові й циркуляційні струми в досліджуваних вузлах.

Такий підхід був покладений в основу інженерних методів розрахунку електромагнітного поля й втрат в основних масивних елементах кінцевих частин потужних турбогенераторів — у натискній плиті магнітопроводу статора, у торцевих щитах, екранах підшипникових вузлів і водневомасляних ущільнень. Численні експерименти показали достатню для практики точність розрахунків, а також ефективні для аналізу варіанти конструкції проектованих генераторів.

Ефективність комплексного методу дослід-

ження теплових процесів у кінцевих частинах турбогенераторів підтверджена розробкою методів аналізу нагрівання вузлів кінцевої частини, при яких розрахунок нагрівання масивних плит, торцевих щитів і екранів проводився або методом еквівалентних теплових схем, або аналітично з використанням характеристик конвективного теплообміну поверхонь, отриманих методом вимірювання локальних коефіцієнтів тепловіддачі, розробленим у нашому інституті (досліди В.М.Ніколаєва на стенді заводу).

Комплекс теоретичних і експериментальних досліджень з даної проблеми викладений послідовно в колективній монографії, що уперше в практиці турбогенераторобудування з'являється як фундаментальне введення в проблему кінцевих частин потужних турбогенераторів [12]. Ця праця заклала основу подальшим дослідженням різних аспектів проблеми кінцевих частин.

Етап інтенсивного розвитку досліджень і розробок в галузі електромеханіки в ІЕД АН УРСР (1971—1990 рр.) характеризується великими досягненнями в галузі теорії електромеханічного перетворення енергії й проведенням на цій основі багаточисельних прикладних досліджень та отриманням розробок разом із заводами електротехнічної промисловості країни, які завершувалися серійним виробництвом електричних машин різних типів і конструкцій.

Найбільш активно розвивалися дослідження електромагнітних і теплових полів у турбогенераторах граничних потужностей. Тісне співробітництво вчених Інституту електродинаміки з НДІ заводу "Електроважмаш" дозволило заводу значно поліпшити конструкції турбогенераторів потужністю 200 і 300 МВт та підвищити їхню надійність. При цьому інтегральний показник надійності — коефіцієнт готовності в 80-і роки за статистичними даними досяг значень 0,995—0,999, що відповідало світовому рівню.

Загальні вимоги до турбогенераторів граничних потужностей 200—1000 МВт для теплових і атомних електростанцій обгрунтовувалися техніко-економічними умовами роботи електростанцій в енергосистемі, а виникаючі проблеми в їхньому створенні необхідно було вирішувати в умовах швидкого росту одиничної потужності. Так, зокрема, генератори потужністю 200 і 300 МВт вже серійно випускалися в 60-х роках, проектувалися в цей період турбогенератори потужністю 500—800 МВт, а наукові дослідження в НДІ "Електроважмаш" і "Електросила" орієнтувалися на створення ТГ потужністю 1000 МВт і вище [13]. Необхідно при цьому врахувати, що турбогенератори широкого діапазону потужностей від 100 до 1000 МВт характеризуються швидким зростом електромагнітних навантажень при незначному збільшенні габаритних розмірів, що лімітується умовами транспортування. Збільшення потужності в даному габариті досягається шляхом інтенсифікації охолодження активної зони й удосконалюванням конструкції. При цьому центральною науковою проблемою стає вивчення електромагнітних, теплових і механічних процесів для обгрунтування конструкцій, рішення технологічних і експлуатаційних завдань.

Розвиток енергосистем країни, створення магістральних ліній електропередач на 500—750 кВ і вище, а також прийнята в СРСР технічна політика щодо вирішення питань розміщення джерел реактивної потужності в розподільчих мережах і у споживачів електроенергії висунуло проблему експлуатації ТГ у режимах недозбудження, в режимах споживання реактивної потужності, що не передбачалося стандартами й технічними умовами й вимагало обмеження потужності ТГ. У цей же період загострилася проблема нерівномірності електроспоживання й, відповідно, виникла необхідність роботи ТГ у маневрених режимах. Треба було створити модифікації ТГ потужністю 60—200 МВт для пікових і напівпікових режимів із частими пусками й остановами.

Крім цього, на початку 70-х років була поставлена в загальнодержавному масштабі проблема використання надпровідників у системах генерування й передачі електроенергії. Відповідно, в організаціях і на заводах Мінелектротехпрому розгорнулися широкі НДР і ДКР по створенню турбогенераторів з використанням надпровідних матеріалів і кріогенного охолодження для обмоток збудження. При цьому передбачалося створення кріотурбогенераторів (КТГ) надвеликих потужностей (2000—3000 МВт), а також спеціальних генераторів для автономних енергокомплексів потужністю до десятків МВт із метою одержання необхідних масогабаритних показників.

Вивчалися також питання створення надпотужних ліній електропередачі з використанням надпровідників і кріогенного охолодження, а також кріотрансформаторів, надпровідних накопичувачів і апаратури.

У цих умовах ІЕД АН УРСР підтримав ініціативу Фізико-технічного інституту низьких температур АН УРСР і наукового керівника цієї тематики директора ФТІНТ, академіка АН УРСР Б.І.Веркіна.

У цей же період з ініціативи І.М.Постнікова в інституті активно розгорнулися дослідження із проблеми створення потужних асинхронних генераторів (АТГ). Цей новий тип генераторів в умовах електроенергетики, що розвивається, може істотно підвищити ефективність функціонування системи "електростанція-енергосистема".

Фундаментальною науковою проблемою, необхідною для ефективного розвитку досліджень по всіх трьох вищевказаних напрямках, стала проблема поглибленого вивчення розподілу характеристик електромагнітних полів в елементах конструкції, включаючи кінцеві частини потужних ТГ, КТГ і АТГ, а також процеси в масивному роторі.

Розроблено нові методичні принципи побудови математичних моделей активної зони таких машин, які дозволяють одержати уточнені картини розподілу електромагнітного поля в обсягах основних електропровідних елементів при врахуванні уточненого опису струмів статора й ротора в повному обсязі, включаючи активні й лобові частини обмоток.

Метод джерел впливу розроблено для одержання уточнених аналітичних рішень рівнянь електромагнітного поля в системі провідних напівсмуг з різними електромагнітними параметрами при збудженні поля системою струмів, які утворять струмовий шар.

Розроблено метод кінцевого Т-інтегрального перетворення для розрахунку фізичних полів (електромагнітних, теплових, механічних і ін.) у складних багатозв'язаних областях. Розроблено метод контурів розподілених струмів для розрахунку вихрових струмів і об'ємних втрат у незамкнутих структурах, що дозволяє більш точно розраховувати розподіл втрат поблизу концентраторів поля, урахувати крайові й інші ефекти.

Аналітичні розв'язки рівнянь електромагнітного поля в активній і кінцевій зонах ТГ, проведені з використанням розроблених методів, дозволили провести дослідження на ЕОМ ряду конкретних конструкцій і оптимізувати різні варіанти за критерієм мінімальних нерівномірностей питомих втрат у досліджуваних елементах.

Ці ж методи дозволили проаналізувати шляхом обчислювального експерименту на ЕОМ ефективність різних конструкцій багатошарових екранів ротора КТГ із надпровідною обмоткою збудження (НПОЗ). Уперше проведено детальний аналіз системного екранування НПОЗ від впливу змінних магнітних полів при можливій несиметрії струмів фаз статора КТГ. Показано несприятливу для екранування НПОЗ картину обтікання екрана в активній зоні ротора й посилення електромагнітного поля в зоні лобових частин НПОЗ. Вперше досліджено вплив нелінійності при кріогенних температурах у великому діапазоні на теплове і електромагнітне екранування НПОЗ.

Уперше проведені фундаментальні дослідження процесів екранування незамкнутими структурами в різних електротехнічних пристроях і машинах. Виявлено загальні особливості й закономірності екранування такими структурами у змінному магнітному полі. У результаті запропоновано способи й конкретні пристрої, що екрануються, які дозволили в кілька разів збільшити локальні коефіцієнти екранування [30].

Проведено великий комплекс досліджень, пов'язаних зі створенням високоефективних електромагнітних екранів, застосування яких орієнтовано на захист від електромагнітних полів розсіювання в турбо- і гідрогенераторах, потужних синхронних компенсаторах із широким діапазоном регулювання реактивної потужності, генераторах — двигунах великої потужності для енергоагрегатів станцій, що гідроакумулюють, а також електромашин спеціального призначення [30]. Відзначимо, що теорія електромагнітного екранування, яка заснована на отриманих аналітичних розв'язках задач розрахунку квазістаціонарного поля в тілах обмежених розмірів, розроблена вперше в практиці електромашинобудування і вперше дозволила точно описати й розрахувати характеристики поля поблизу границь таких тіл — екранів, а також явища дифракції низькочастотного електромагнітного поля. За цикл робіт "Дослідження електромагнітних полів у потужних турбогенераторах та електричних машинах з використанням надпровідності" (автори Счастливий Г.Г., Титко О.І., ІЕД АН УРСР, Данько В.Г., НДІ завод "Електроважмаш") постановою Президії АН УРСР від 18 січня 1979 року присуджено премію ім. Г.Ф.Проскури. Окремі конструкції екранів використані у турбогенераторах, що серійно випускаються заводом "Електроважмаш" (ТГВ-200М, АСТГ-200 і ін.), а також у деяких електричних машинах спеціальних типів.

Методи математичного моделювання електромагнітних полів у складних областях конструкцій потужних ТГ і КТГ у сполученні з фізичним моделюванням ефективні на стадії НДР і попереднього (предпроектного) аналізу нових типів потужних генераторів.

Методи фізичного моделювання електромагнітних полів, розподілу втрат, нагрівання й теплопередачі в потужних турбогенераторах, включаючи дослідження безпосередньо на стенді заводу "Електроважмаш" і на електростанціях при різних режимах навантаження, одержали високу оцінку інженерів і вчених на багатьох заводах і галузевих НДІ.

Високий професіоналізм, винахідливість і науковий рівень експериментаторів Єзовіта Г.П., Карацуби А.С., Бабяка А.А., Євтушенка І.М., Ніколаєва В.М., Пижова О.О., Бута О.О. й ін. дозволили затвердити комплексний метод математичного й фізичного моделювання фізичних полів у потужних генераторах, як найбільш ефективний метод досліджень.

Проблеми інтенсифікації охолодження ТГ зростаючих потужностей поставили найбільш актуальні завдання уточнення теплових розрахунків як обмоток і магнітопроводу, так і деталей кріплення шихтованого магнітопроводу, екрануючих і демпферних систем, масивного ротора та ін.

Відомі методики теплових розрахунків ТГ, що базуються на аналізі одно- і двомірних моделей теплових полів, треба було розвинути на рівень математичного моделювання тривимірних теплових полів в об'ємах складної геометричної форми з істотною нерівномірністю розподілу питомих втрат в об'ємі й при нерівномірній інтенсивності теплообміну на поверхнях, що охолоджуються. Треба було строго враховувати підігрів охолоджуючого середовища в системах охолодження обмоток, магні-

топроводу й конструктивних деталей, що перебувають під впливом полів розсіювання.

Показано перевагу застосування методів кінцевих різностей і кінцевих елементів для розв'язання рівнянь Пуассона-Фур'є, що описують процеси теплопередачі в конструктивних вузлах електричних машин.

Проаналізовано на ЕОМ процеси теплопередачі в стаціонарних і нестаціонарних режимах в обмотці статора й крайніх пакетах магнітопроводу й показана доцільність вжитих заходів для підвищення ефективності функціонування конструкції потужних ТГ. Найбільш складне завдання вирішувалося при аналізі нагрівання крайніх пакетів осердя статора у зв'язку з недостатньою деталізацією розподілу питомих втрат у цих вузлах. Комплексний підхід до рішення цього завдання реалізований із застосуванням методів математичного й фізичного експериментів. Дослідження температурних полів безпосередньо на ТГ потужністю 200 МВт у навантажувальних режимах і ТГ потужністю 500 МВт на стенді заводу (досліди поставлені Г.П.Єзовітом за участю НДІ "Електроважмаш") дозволили вирішувати завдання знаходження функції об'ємного розподілу питомих втрат для цих конструкцій і провести аналіз шляхів удосконалювання конструкції крайніх пакетів, нагрівання яких обмежувало навантаження ТГ у режимах недозбудження й споживання реактивної потужності [12, 16, 17].

Ініціативні дослідження із проблем створення потужних асинхронних турбогенераторів охоплювали широкий комплекс питань підвищення ефективності функціонування електростанцій і енергосистем з урахуванням балансу активної й реактивної потужностей в енергосистемі, створення різних типів АТГ, у т.ч. АТГ-с зі статорним збудженням і АТГ-р з роторним збудженням. Показано переваги застосування АТГ у генеруючих вузлах енергосистем і доведена доцільність використання АТГ на електростанціях разом зі звичайними ТГ [18].

Практична реалізація типу АТГ на першому етапі визначалася умовами фінансування всього комплексу НДОКР із боку замовника — Мінпенерго. При активній підтримці ВНДІ електроенергетики пріоритетною стала розробка АТГ-р, комплекс робіт виконувався разом із НДІ "Електроважмаш", що виконав складну роботу з конструктивно-технологічної частини, а також із ВНДІЕ, що розробив систему збудження з регульованою частотою струму ротора.

Основний обсяг досліджень електромагнітних і теплових процесів у генераторі даного типу потужністю 200 МВт (АСТГ-200) виконано в ІЕД у співробітництві із вченими КПІ [18, 19].

Досліджено електромагнітні й теплові процеси в роторі АСТГ, розроблено методи розрахунку параметрів і характеристик генератора з урахуванням впливу масиву ротора, досліджено динамічні процеси й стійкість керованого АТГ-р.

Розроблені методи розрахунку процесів у роторі АТГ-р і питання розрахунку втрат і нагрівання крайніх пакетів сердечника статора в широкому діапазоні регулювання активної й реактивної потужностей [12, 14, 16] використані при проектуванні першого у світовій практиці турбогенераторобудування генератора АСТГ-200, виготовленого на заводі "Електроважмаш" і який успішно експлуатується на Бурштинській ТЕС із 1985 р.

Умови експлуатації АТГ, а також ТГ потужністю 100—200 МВт вимагають забезпечення їхніх показників надійності в умовах добового регулювання активної й реактивної потужностей. Досвід показує, що ряд вузлів генераторів піддається при циклічних змінах навантаження прискореному зношенню. При цьому скорочується загальний і міжремонтний ресурс таких вузлів як обмотки статора й ротора, елементи кріплення й магнітопроводу та ін. Основною причиною таких явищ варто вважати підвищене зношення ізоляційних, провідникових і механічно навантажених елементів в умовах циклічної зміни пружньопластичного, в'язкопружнього й в'язкопластичного стану елементів, що піддаються впливу електромагнітних, теплових і механічних навантажень. Досвід роботи відділу моделювання машин змінного струму протягом 60—70-х років показав необхідність розробити й здійснити в процесі проектування, виготовлення й експлуатації ТГ нових типів більш досконалу систему забезпечення високими, згідно зі стандартами, й економічно обгрунтованими показниками надійності на всіх етапах життєвого циклу ТГ. Тривалість такого циклу, як показує досвід, у багатьох випадках значно перевищує розрахунковий ресурс 30—40 років, і це варто враховувати як при створенні нових ТГ (забезпечуючи необхідні показники по довговічності й ремонтопридатності), так і в процесі тривалого експлуатаційного періоду (по показниках живучості, безаварійності особливо на кінцевому періоді експлуатації).

Концептуально проблеми надійності ТГ і перспективних КТГ представлені в монографії [20], де комплексний підхід до забезпечення надійності на етапах проектування, виробництва й експлуатації викладається вперше. Пізніше ці ідеї одержали свій розвиток у напрямку дослідження тепломеханічних процесів в обмотках і магнітопроводі ТГ за умов змінних електромагнітних навантажень [16, 21, 22].

Проведення уточнених розрахунків нагрівання вузлів і елементів ТГ дозволяє не тільки аналізувати прийнятність розроблених конструктивних рішень, але й оцінювати якість технологічних операцій при зборці. Наприклад, недоліки укладання обмотки в пази ротора можуть приводити до зміни температурного поля по колу, що призводить, у свою чергу, до виникнення підвищених вібрацій. Закупорка елементарних провідників стержнів обмотки статора охолоджуваних дистилятом, як показує практика, може призводити до перегріву

ізоляції й аварій. Уточнений тепловий розрахунок нагрівання стержнів водоохолоджуючої обмотки статора дозволяє визначити рівні максимумів температури й обгрунтувати вимоги до систем контролю й діагностики для ідентифікації таких дефектів у генераторах [28].

Результати багаторічних досліджень і розробок у галузі створення нових типів ТГ, які проводилися вченими відділу моделювання машин змінного струму ІЕД АН УРСР, заводом "Електроважмаш" та НДІ заводу, а також за участю ВНДІелектромаш (м. Ленінград) відзначені Державною премією УРСР у галузі науки і техніки 1990 року.

За розробку наукових основ і методів підвищення навантажувальної спроможності та надійності турбогенераторів серії ТГВ виробничого об'єднання "Електроважмаш", створення і впровадження технічних рішень по конструкції їхніх торцевих зон лауреатами Державної премії стали Глєбов І.О. (ВНДІелектромаш), Счастлівий Г.Г., Постніков І.М., Титко О.І., Смородін В.І. (ІЕД АН УРСР), Кузьмін В.В., Черемісов І.Я., Підгорний Б.М. (завод "Електроважмаш").

Роботи в області нових типів асинхронних двигунів (АД) малої потужності одержали в 70—80-х роках розвиток у теоретичному й прикладному плані. Розроблено математичні моделі й методи розрахунків на ЕОМ електромагнітних процесів для проектування різних типів АД малої потужності. Серед таких робіт слід зазначити універсальні математичні моделі для розрахунків статичних характеристик симетричних і несиметричних АД із традиційними й спеціальними обмотками.

Важливим напрямком у створенні нових типів АД стало створення модифікацій двигунів у складі серій, що випускаються в країні. Двигуни таких модифікацій істотно підвищують ефективність різноманітних технологічних приводів. До таких належать багатошвидкісні АД, що забезпечують дискретне регулювання швидкості механізмів з високими енергетичними характеристиками. В Україні цей напрямок розвивався досить широко, випуск АД таких модифікацій досягав по обсягу до 10% випуску масових серій [23]. Основна ідея створення багатошвидкісних АД базується на побудові сумісних обмоток, що забезпечує істотне поліпшення техніко-економічних показників.

Проведено теоретичний аналіз різних методів синтезу схем полюсоперемикаючих сумісних обмоток і обгрунтовано шляхи побудови схем з необхідним характером електромагнітного поля з врахуванням його просторових гармонік.

Співробітниками відділу електромеханічного перетворення енергії в цей період отримано понад 250 авторських посвідчень й патентів на схеми таких обмоток (А.І.Антоненко, О.О.Войтех, Г.М.Киричек, І.І.Краштан та ін.). Полюсоперемикаючі АД зі сумісними обмотками одержали широке впровадження для привода ліфтів і багатьох інших механізмів.

Ці досягнення грунтуються на серйозній теоретичній базі дослідження перехідних процесів у АД таких типів та розроблених в інституті методах розрахунку [24].

Багатопланове завдання створення електроприводів з регульованими АД одержало цікаве рішення в створенні двигунів із частотнозалежними параметрами ротора. Незважаючи на обмежений діапазон регулювання й підвищені втрати, такі двигуни завдяки їхній простоті й надійності одержали практичне використання в ряді приводів механізмів потужністю до 50кВт (О.О.Войтех, Г.М.Киричек, П.Ф.Вербовой й ін.).

Активність наукових працівників відділу електромеханічного перетворення енергії сприяла співробітництву з багатьма електромеханічними заводами, у т.ч. Смілянським, Ужгородським, Миколаївським, Полтавським і Олександровським заводами, а також СКБ "Укрелектромаш" м. Харків, об'єднанням "Ельфа" (Литва).

Наприкінці 70-х років в інституті організовано відділ безконтактних електричних машин (кер. А.І.Ліщенко), що розвиває дослідження в області створення синхронних і асинхронних двигунів (СД, АД) з масивним феромагнітним ротором, асинхронних генераторів з новими системами ємнісного й вентильного збудження, електромеханічних систем з реалізацією складних законів руху й програмним керуванням, а також лінійних асинхронних двигунів.

Дослідження синхронних і асинхронних двигунів з масивним феромагнітним ротором (МФР) дозволили обгрунтувати можливість створення СД і АД великої потужності (20-30 МВт) з поліпшеними пусковими й енергетичними характеристиками. Методи теоретичного аналізу й розроблені розрахункові методики [25] підтверджені дослідженими на реальному АД із МФР, що був виготовлений у промисловому варіанті й встановлений на електростанції для власних потреб енергоблоку потужністю 300 МВт. Ідея застосування таких двигунів плідна, особливо для маневрених енергоблоків електростанцій, для яких технічні вимоги встановлюють циклічність роботи із забезпеченням не менш 10 тисяч пусків і зупинок як ресурсний термін служби. Практика показує, що звичайні АД з короткозамкненою обмоткою ротора не витримують такого числа циклів, і ушкодження стержнів клітки внаслідок термомеханічних напруг відбувається швидше в кілька разів.

Проведено широкий комплекс розрахунково-теоретичних досліджень у сполученні з експериментами на лабораторних зразках численних варіантів асинхронних генераторів (АГ) з ємнісним збудженням. Розроблено різноманітні АГ, що відрізняються схемами обмоток статора, використанням різних способів включення батарей конденсаторів і застосуванням аналого-цифрових систем керування, що забезпечують високу якість функціонування АГ у робочих і перехідних режимах

(А.І.Ліщенко, В.А.Лісник, А.П.Фаренюк).

Досліджено можливості створення машинно-вентильних комплексів на основі АГ з вентильним збудженням і автоматичним керуванням (Ліщенко А.І., Мазуренко Л.І.).

Проведено великий обсяг теоретичних та експериментальних досліджень і розробок нових технологічних схем і конструкцій електромеханічних систем для реалізації безпосереднього безредукторного приводу на основі крокових і вентильних двигунів. Застосування нових систем керування й конструкцій електромагнітної частини дозволило створити електроприводи лінійного, коливального, поворотного й обертового руху для транспортних систем, верстатобудування, робототехніки й іншого технологічного устаткування (А.О.Афонін, В.В.Гребенніков і ін.). Стале творче співробітництво з фахівцями НВО "Ротор" (м.Черкаси) дозволило протягом 80-х років реалізувати ряд практичних розробок різного призначення.

Питання створення генераторів і двигунів середніх потужностей для автономних енергокомплексів, у тому числі й бортових різної потужності й призначення, пов'язуються із проблемою досягнення поліпшених масогабаритних характеристик і надійності. Завдання підвищення потужності при заданому габариті вирішуються шляхом створення інтенсивних систем охолодження, а також використання нових матеріалів і технологій.

Прикладом ефективного рішення такого завдання у відділі моделювання машин змінного струму є дослідження теплових режимів і розробка методів теплового проектування синхронних генераторів з маслоструйною системою охолодження для висотних літаків. Ідея запропонована В.В.Бандуріним у співробітництві з інженерами ОКБ "Дзержинець" (м. Москва). Проведено дослідження нагрівання й теплопередачі в активній зоні високооборотних генераторів потужністю 60 МВт. У розвиток методів дослідження конвективного теплообміну на поверхнях обмоток статора й ротора, розроблено новий метод дослідження на макетах і реальних зразках генераторів з маслоструйним охолодженням. Розроблені методи розрахунку забезпечили вирішення завдань проектування генераторів такого типу [26]. Використання цих результатів дозволило створити в ОКБ "Дзержинець" ряд таких конструкцій, масогабаритні показники яких відповідають показникам світового рівня. Серійне виробництво таких генераторів показало їхню високу надійність.

У багатьох системах електропривода необхідно створювати електродвигуни, занурені у рідину. Прикладом ефективного рішення такого завдання стало дослідження теплових процесів у водозанурених електродвигунах для свердловинних електронасосів із частотою обертання 3000 об/хв. Проектування електродвигунів такого типу здійснювалося з використанням наукових результатів досліджень в ІЕД АН УРСР і конструкторів СКТБ заглиблених електронасосів (м. Кишинів) і забезпечило серійне виробництво двигунів такого типу потужністю до 125 кВт [27].

Створення методик дослідження й проектного розрахунку теплових процесів електродвигунів, заповнених діелектричною рідиною, привело до створення універсальної методики теплового розрахунку електродвигунів широкого діапазону потужностей — від мікромашин до машин середньої й великої потужності (до сотень і тисяч кіловат).

Обгрунтовано еквівалентне перетворення системи кінцево-різницевих сіток, що описують розподіл температури в елементах і вузлах генераторів та двигунів, до розрахункової еквівалентної схеми, що містить до 200 елементів. Алгоритми й програми розрахунків на ЕОМ для ряду конструкцій рідинно-заповнених електродвигунів використовуються в практичних розрахунках [28]. Ці розрахунки дозволили підвищити ефективність досліджень конструкцій принципово нових типів машин і скоротити обсяги й строки випробування й доведення дослідних зразків на стендах заводу й передачі їх у серійне виробництво.

Великим досягненням в області електромеханіки є розробка принципово нового типу електродвигунів — триступеневих електричних машин.

Основи теорії електродинамічних систем з трьома ступенями свободи обертання ротора були розроблені у 1956 р. членом-кореспондентом АН УРСР О.М.Міляхом, який вперше оприлюднив ідею, дав принципову схему побудови, розробив та дослідив математичну модель пристрою, який містив нерухому і триступеневу рухому трисекційні обмотки [69]. Пізніше, у 60-і роки, в СРСР почалося створення електромеханічних систем з швидкісним триступеневим ротором, роторна обмотка в яких була замінена постійним магнітом, і які було названо триступеневими електричними машинами. З того ж часу в ІЕД АН УРСР розпочинається розробка теорії таких машин. Доктором технічних наук В.А.Барабановим був створений метод досліджень триступеневих обертових систем, заснований на математичному зображенні взаємодії сферичних гармонік поля, що збуджуються на поверхні ротора і статора, розроблена розрахункова модель та визначені їхні параметри [29]. У 80—90-х роках відбувалося подальше поглиблення теорії електричних машин з триступеневим ротором, створено методики розрахунку параметрів і характеристик, нові ефективні структури, проведена їхня оптимізація. На науковому рівні вирішувалися принципові питання технології триступеневих машин, розроблено методи інформаційного забезпечення їх функціонування. Результати цих досліджень знайшли широке застосування при розробці спеціальних систем слідкування в ЦКБ "Арсенал", ЦК і ПТБ "Точність" (Україна), АТ "Пеленг" (Білорусь), АООТ "ЗОМЗ", ЦНДІІ "Точмаш", ЦКБ "Фотон" (Росія), чим було підтверджено ефективність самої ідеї триступеневих машин та реалізованих в

них наукових принципів. Роботи з поглиблення теорії систем з триступеневим ротором пов'язані з дослідженнями впливу власних полів розсіювання на точність роботи і пошуком принципів підвищення їх точності.

У середині 80-х років у зв'язку з необхідністю побудови компактних і економічних приводних систем для двокоординатного орієнтування різноманітних об'єктів в ІЕД АН УРСР було розпочато створення електромеханічних систем з двоступеневим ротором, яким дали назву двокоординатних електричних машин (ДЕМ). Одночасно почалась розробка теорії таких машин. Застосування ДЕМ як скануючого та моментного привода дозволило підвищити можливості систем слідкування по швидкодії до 20 разів та по зусиллям, що розвиваються, до 7 разів у порівнянні з відомими технічними рішеннями в ідентичних об'ємах. Принципи побудови оптимізованих ДЕМ і деякі їхні структури [67] застосовані в двокоординатних приводах спеціальних систем в ЦКБ "Арсенал" (Україна) та МНДІРС (Росія). В цей час продовжується пошук нових ефективних структур ДЕМ, в тому числі в комбінації з триступеневим швидкісним ротором, проводиться розробка мініатюрних вбудованих систем управління з використанням сучасної елементної бази.

З широкої сім'ї безконтактних магнітоелектричних систем найбільш широке розповсюдження знайшли системи з одноступеневим ротором, які більш відомі як безконтактні магнітоелектричні двигуни з вентильним управлінням (БМД). В ІЕД НАН України створення БМД було розпочато у 70-і роки, після виникнення вітчизняних висококоерцитивних постійних магнітів типу R_{co}, які дозволили підвищити питому потужність двигунів, зменшити їх габарити та вагу.

Третій етап розвитку досліджень із проблем електромеханіки, що охоплює період 1991—2006 рр., характеризується ускладненням умов проведення науково-дослідних робіт і, особливо, дослідно-конструкторських робіт разом із КБ заводів-виготовлювачів у період становлення незалежності України. Скоротився склад учених і інженерів, що беруть участь у дослідженнях з основних напрямків електромеханіки, порівняно з попереднім періодом. Однак, напрямок, пов'язаний з вирішенням проблем підвищення ефективності й надійності процесів електромеханічного перетворення енергії, розвивається успішно, зосереджуючи зусилля на вирішенні актуальних для України проблем.

В області потужного генераторобудування, а також в області вирішення проблеми підвищення навантажувальної здатності й надійності турбо- і гідрогенераторів, які довгостроково експлуатуються на електростанції в умовах, що ускладнилися, проводиться цикл досліджень електромагнітних полів, теплових і тепломеханічних процесів в активній та кінцевих зонах турбогенераторів великих потужностей для ТЕС і ТЕЦ, а також надпотужних ТГ для енергоблоків АЕС потужністю 1000 МВт, в т.ч. при наявності дефектів, що зароджуються та розвиваються.

Продовжувались традиційні дослідження нових конструктивних рішень і систем забезпечення, спрямованих на підвищення надійності й навантажувальних можливостей генераторів. Проводилися роботи по вдосконаленню принципів конструктивного виконання крайніх пакетів статора, елементів кріплення, демпферних систем ротора, систем охолодження та інших вузлів машин. При цьому одержали розвиток нові методи досліджень. Так, задача створення механічно міцної й розвантаженої в тепловому й електродинамічному відношеннях конструкції крайніх пакетів, яка не має аналогів у світі, вирішувалася методом синтезу магнітного поля в торцевій зоні машин [33].

В останні десятиліття в галузі генерування електроенергії на електростанціях України (ТЕС, ТЕЦ і ГЕС) загострилася проблема, пов'язана з вимушеною експлуатацією турбо- і гідрогенераторів у маневрених режимах. При цьому генератори потужністю 100, 150 і 200 МВт, які вже відпрацювали розрахунковий ресурс і призначені для базових режимів у зв'язку зі збільшенням частки АЕС, стали переводитися в маневрений режим. Досвід показує, що при цьому в активних і конструктивних вузлах генератора підсилюються процеси деградації й збільшується ризик серйозних аварій.

Набули актуальності задачі експлуатаційного контролю (оцінки) і подовження залишкового ресурсу генераторів у цілому й окремих їхніх вузлів, зокрема. У зв'язку з розвитком процесів деградації в старих машинах необхідно також вирішувати проблеми підвищення енергетичних показників надійності й безпеки експлуатації як генераторів, так і устаткування для власних потреб електростанцій. З'явилася також нова проблема вибору оптимальної стратегії інноваційної модернізації генеруючого устаткування. По цих та інших нових напрямках проводилися й продовжують проводитися дослідження в інституті.

Наукові дослідження, необхідні для вирішення проблеми підвищення маневреності при мінімальних витратах на модернізацію генераторів, що дозволяє підвищити їхню надійність, пов'язані з вивченням процесів електротепломеханічного навантаження на ізоляційні конструкції обмоток і магнітопроводу [34].

Уперше проведені дослідження нестаціонарних термомеханічних процесів у турбогенераторах для вивчення особливостей розподілу напружень, в т.ч. у місцях їхньої концентрації. Дослідження термомеханічних процесів проведені також в роторах синхронних і асинхронних генераторів, в т.ч. з метою виявлення чутливих діагностичних параметрів для ідентифікації дефектів.

Актуальне також дослідження методів стабілізації тепломеханічних процесів в обмотках і маг-

нітопроводі шляхом застосування регульованих систем охолодження при зміні електромагнітних навантажень. Ряд ідей по вирішенню таких проблем досліджувався раніше [16,20,21] і розвиток таких досліджень триває [35, 36].

Одним з ефективних засобів підвищення надійності експлуатації генераторів може служити система індивідуального моніторингу, яка стежить за зміною навантажувальної здатності відповідальних вузлів конструкції, що і дозволяє прогнозувати їхній залишковий ресурс, щоб уникнути серйозних аварій.

У цьому напрямку отримані вагомі результати. Розроблено й досліджено методами математичного й фізичного моделювання нові ефективні способи й пристрої діагностики практично всіх основних вузлів генераторів і двигунів власних потреб, для яких мають місце ушкодження [37-42]. Велику увагу приділено розробці та дослідженню нових способів і пристроїв діагностики роторів потужних генераторів. При цьому особлива роль належить контролю швидкоплинних процесів, характеристики яких, як показують дослідження, є найбільш чутливими діагностичними параметрами.

Розвинено теорію функціонального моніторингу електричних машин змінного струму з урахуванням специфіки розвитку в них взаємозалежних процесів. Розроблено та досліджено нові способи та пристрої діагностики на основі розгляду всіх взаємозв'язаних фізичних процесів в електричних машинах: електромагнітних, електрофізичних, теплових, вентиляційних, механічних, термомеханічних та інших. Досить ефективною є діагностика, яка базується на стохастичних моделях, які досліджувались при визначенні дефектів в підшипниках, щітково-контактних вузлах електричних машин, де випадкові процеси є домінуючими. На основі розроблених та відомих окремих способів діагностики розроблено принципи побудови глобальних систем функціонального моніторингу енергетичних електромашин [43—45]. Глобальні системи мають оболонку експертної системи чи логічних процедур, яка забезпечує ідентифікацію дефектів на основі трьох-п'яти правил чи процедур та прогноз контрольованих параметрів або прогнозну діагностику.

У цей період проводилася інтенсивна робота в області створення статистичних моделей, методичних засобів оцінки й контролю, а також технологій підвищення залишкового ресурсу турбо- і гідрогенераторів [46—48]. Розроблені моделі враховують майже всі основні фактори, що визначають залишковий ресурс генераторів, що перебували в експлуатації. Уперше показано, що існують локальні зони максимального температурного старіння, залишковий ресурс яких може бути менше на десятки років, ніж ресурс іншої частини обмотки статора ТГ. Вивчено кількісні показники залежності залишкового ресурсу обмоток статора генераторів від режимів їхньої експлуатації.

Отримано ряд істотних результатів в області розробки методів експлуатаційного контролю [49—51] й конструктивних рішень і технологій підвищення енергетичних показників потужних генераторів і електродвигунів для власних потреб електростанцій [52, 53]. Досліджені для багатьох типів турбогенераторів способи зниження втрат за рахунок зменшення товщини сегментів заліза статора та підвищення чистоти водню забезпечують суттєве збільшення виробництва додаткової електроенергії. Особливо ефективним вказаний спосіб є при застосуванні на генераторах, які відпрацювали свій розрахунковий ресурс і для яких енергетичні показники знизилися.

Проблема енергетичного обладнання, що перебувало в тривалій експлуатації й вичерпало розрахунковий ресурс, висуває також економіко-фінансові завдання для прийняття оптимальних рішень по строках і видах режимів та ремонтів, заміни й модернізації обладнанням з умовою максимального прибутку на прогнозований період. Для цих цілей розроблені моделі, методики й програмні засоби з використанням методів динамічного програмування [54].

Розроблені методичні засоби дозволяють не тільки визначати оптимальні технології інноваційної й структурної модернізації й обслуговування, оптимальні режими обладнання, але й прогнозувати його залишковий ресурс за економічною доцільністю експлуатації.

Відомо, що в найближчі 10—15 років для стабільного електропостачання економіки України необхідно модернізувати й замінити більше 100 енергоблоків. Заміна обладнання повинна здійснюватися з врахуванням того, що генеруюче обладнання успішно буде вирішувати всі задачі економіки в перспективі, через 20—40 років. У цьому зв'язку інститут проводить роботу над розробкою теорії й принципів створення генераторів нового покоління синхронно-асинхронного типу, які успішно вирішують ряд сучасних і перспективних завдань. У цьому напрямку проведено цикл фундаментальних досліджень електромагнітних параметрів, втрат, теплових і механічних характеристик, статичної і динамічної стійкості [55—60]. Розроблено теорію генераторів як з однією, так і з двома обмотками збудження для роботи їх у синхронних і асинхронних режимах, у т.ч. при замкнутій обмотці збудження при активному навантаженні близько 80% від номінальної, а також у режимах зі споживанням реактивної потужності, без обмежень у часі. Досліджено ряд схем і технічних рішень для синхронно-асинхронних машин, які можна реалізувати при створенні нових і модернізації генераторів, що перебувають в експлуатації. Досліджено ефективність таких генераторів в плані забезпечення динамічної стійкості при аварійних ситуаціях не лише даних машин, але і всього генеруючого обладнання електростанцій.

Дослідження в області створення нових полю-

соперемикаючих асинхронних двигунів проводилися в напрямку розробки математичних моделей для аналізу різних схем обмоток, у т.ч. застосовуваних за кордоном. Порівняльний аналіз цих способів з розробленими в інституті визначає шляхи підвищення ефективності таких двигунів. Розроблений табличний метод побудови схем обмоток дозволяє оцінити симетрію синтезованих обмоток з врахуванням основних і вищих просторових гармонік магнітного поля.

Дослідження вибухобезпечних електродвигунів, які були створені працівниками промисловості й Інститутом вибухобезпечного електроустаткування (м.Донецьк) за участю ІЕД НАН України (Г.М.Федоренко), відзначені Державною премією України в галузі науки й техніки в 2001 році.

Розвиток досліджень в області автономних енергокомплексів на даному етапі орієнтовано на вдосконалення машино-вентильних систем з асинхронним генератором [61].

У числі багатьох розробок таких комплексів відзначимо універсальні автономні генератори з автоматичним керуванням потужністю до 200 кВт для транспортних енергоустановок, що забезпечують необхідні показники якості електроенергії при змінній частоті обертання приводного двигуна. Система дозволяє споживати одночасно різне навантаження змінним і постійним струмом заданої напруги.

Розроблено високошвидкісні стартер-генератори для транспортних самохідних установок потужністю до 100 кВт. Використання високої частоти обертання (18000 об/хв.) забезпечує гарні масогабаритні показники, а система автоматичного регулювання збудження забезпечує стабілізацію напруги АГ при зміні частоти обертання в 2—2,5 рази. Розроблено методи проектування таких енергоустановок [31].

Активно розвивалися дослідження й роботи зі створення нових типів електромеханічних систем на основі керованого струмового шару з оптимізацією використання електромагнітної енергії в зоні перетворення. Використання нових ідей, конструктивних, технологічних і схемотехнічних рішень, сучасних магнітних матеріалів і електронних компонентів дозволяє реалізувати електромеханічні системи нового типу з високими техніко-економічними показниками (А.О.Афонін, В.В.Гребенніков).

В даний час спостерігається тенденція підвищення технічних показників виконавчих пристроїв, що генерують, за рахунок розробки і впровадження нових технологій у сучасних електромеханічних перетворювачах енергії (ЕМПЕ), що забезпечують підвищення технічних характеристик при одночасному вирішенні проблем енерго- і матеріалозбереження [62—66]. В Інституті електродинаміки НАН України протягом ряду років активно проводяться дослідження в області розробки і створення ЕМПЕ нового покоління, що характеризуються поліпшеним використанням активної частини, зниженням маси і габаритів, підвищенням ККД і питомої електромагнітної потужності, зниженням рівня втрат, зменшенням шумів і вібрацій. Такі переваги дозволяють застосовувати ЕМПЕ нового типу в пристроях у широкому діапазоні одиничної потужності, у тому числі як у безредукторних електроприводах безпосередньої дії (Direct Electric Drive), так і в таких областях, як машинобудування, транспорт, авіація, привод електромобілів і об'єктів морської техніки, вітроустановки, приводи насосів, вентиляторів, медична техніка та ін.

Роботи в цьому напрямку передбачали реалізацію наступних науково-технічних завдань:

— розробку інноваційних систем збудження на основі постійних магнітів і феромагнітних концентраторів магнітних потоків зі спеціальними формами і геометричними розмірами, що забезпечують підвищення щільності магнітної енергії в області енергоперетворення;

— експериментальні дослідження на фізичних моделях з метою перевірки адекватності результатів комп'ютерного моделювання і проведення вибору найбільш раціональних конструктивних рішень з урахуванням наступних критеріїв: мінімальна маса і габарити ЕМПЕ, енергозбереження і енергоефективність, високі динамічні й експлуатаційні характеристики;

— розробку способів і технічних пропозицій щодо мінімізації пульсацій електромагнітного моменту в зубцово-пазових структурах, поліпшення технічних і експлуатаційних характеристик електричних машин нового покоління з максимальним одиничним електромагнітним моментом, мінімальними габаритними розмірами, високим ККД енергоперетворення і мінімальними рівнями шумів і вібрацій;

— розробку методів проектування і конструювання на основі нової бази знань сучасної електромеханіки з використанням ідей по концентрації магнітної енергії в області перетворення ЕМПЕ.

На основі виконаного циклу досліджень встановлено, що можна змістити верхню границю для повздовжньої компоненти магнітної індукції в робочому зазорі $B_{\delta r}$, що знаходиться в діапазоні 0,4 — 1,1 Тл, до значень $B_{\delta r}$ = 1,5 — 1,9 Тл, зберігши при цьому настільки необхідне для розміщення токових шарів, і, отже, для забезпечення високих електричних навантажень A_a, велике значення робочого зазору δ. Разом з тим доведено, що спеціальне розміщення постійних магнітів дозволяє синтезувати магнітні системи збудження, що забезпечують близькі до необхідних параметри: синусоїдальний або трапецеїдальний закон розподілу $B_{\delta r}(r=r_k, \theta)$ у робочому зазорі, високі середні і максимальні значення. При цьому запропоновані способи концентрації магнітних полів дозволяють досягати величин поля в зазорі в 1,5—2,5 рази більше у порівнянні з величиною залишкової магнітної

індукції постійних магнітів B_r, що використовуються.

Таким чином, розвиток нових типів ЕМПЕ з електронною комутацією тісно пов'язаний з досягненнями в мікро- і енергоелектроніці, інформатиці і матеріалознавстві разом з новими знаннями про сучасні тенденції розвитку ЕМПЕ. Нові магнітотверді матеріали дозволяють конструювати магнітні системи збудження з підвищеною величиною магнітної індукції в зазорі, а технології порошкової металургії — створювати складні магнітні системи з концентраторами магнітного потоку.

Отримали серйозний розвиток дослідження по створенню триступеневих електричних машин, що охоплюють широке коло питань теорії, конструювання й дослідження характеристик двохкоординатних електричних машин (ДЕМ) для систем, що стежать [32]. Розроблено основи теорії й принципи побудови ДЕМ із двоступеневим і триступеневим ротором, описано особливості руху ротора у двох типах ДЕМ. Дослідження рівнянь руху й умов взаємодії статора й ротора різних конструкцій дозволили визначити умови забезпечення необхідних характеристик по точності й швидкодії, що є основними для якісного функціонування систем керування літальних апаратів.

Розроблені принципи розрахункового аналізу для проектування ДЕМ різних призначень дають конкретне обгрунтування вибору конструкцій, що забезпечують виконання функцій відповідно до потреб систем керування руху.

Одним з найцікавіших наукових напрямків інституту є розробка теорії і структур безконтактних приводних магнітоелектричних систем з однією, двома та трьома ступенями свободи обертання ротора, застосування яких є досить ефективним при створенні пристроїв для просторового орієнтування і стабілізації об'єктів.

З середини 90-х років у відділі № 1 почалися системні роботи по розробці принципів побудови та структур ефективних БМД, створенню методів їх розрахунку і оптимізації [68]. Зараз створення структур БМД проводиться із застосуванням нових перспективних електротехнічних матеріалів та сучасної елементної бази. Створені в ІЕД НАН України безконтактні двигуни та генератори торцевого та циліндричного типів мають принципові особливості, завдяки яким досягнута висока технологічність, надійність і низька вартість при високих питомих характеристиках. Завдяки використанню сучасної елементної бази стала можливою мініатюризація блоку управління і його взаємна адаптація з електромеханічною частиною. Безконтактні магнітоелектричні двигуни та генератори, що розроблені в останні роки, знайшли застосування у медичному та автомобільному приладобудуванні, геодезії, паперовій промисловості, у військовій техніці, а також при створенні професійного електроінструменту. Зараз розробка теоретичних та практичних питань безконтактних магнітоелектричних систем з декількома ступенями свободи обертання ротору проводиться під керівництвом доктора технічних наук О.Є.Антонова.

Висновки. Розробка теорії, методів, засобів і технологій вирішення проблем підвищення ефективності й надійності процесів електромеханічного перетворення енергії на основі фундаментальних досліджень, проведених в Інституті електродинаміки НАН України протягом більше 50-річного періоду, забезпечила одержання реального й вагомого наукового й практичного результату в розвиток електромеханіки.

Фундаментальні дослідження проблем електромеханічного перетворення енергії в машинах широкого діапазону потужностей і застосувань — від надпотужних турбогенераторів для енергоблоків теплових і атомних електростанцій до мікромашин для систем керування дали вагомий практичний результат.

Ефективність досліджень в галузі електромеханіки протягом усього періоду нерозривно погоджувалася із практикою. Творчі зв'язки вчених інституту й виробничників забезпечували умови одержання кінцевого результату у вигляді серій високоефективної техніки.

Майбутній розвиток генеруючих потужностей електростанцій, створення високонадійних і ефективних електроприводів є пріоритетною складовою стабільного прискореного розвитку економіки країни. По всіх основних актуальних і перспективних проблемах електромеханіки й електроенергетики інститут успішно продовжує працювати, пріоритетно орієнтуючися на практичні завдання конкретних енергетичних підприємств.

1. *Постников И.М.* Проектирование электрических машин. — Киев: Техн. лит-ра, 1952. — 736 с.

2. *Постников И.М.* Выбор оптимальных размеров в электрических машинах. — М.: Госэнергоиздат, 1951. — 186 с.

3. *Постников И.М.* Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. — Киев: Техника, 1966. — 436 с.

4. *Постников И.М., Счастливый Г.Г.* Метод анализа электрической машины с использованием удельных параметров // Электричество. — 1969. — № 1. — С. 75—80.

5. *Постников И.М.* Методы теоретического исследования однофазных конденсаторных двигателей // Труды Ин-та электротехники АН УССР. — 1956. — № 14. — С. 5—51.

6. *Войтех А.А.* Многоскоростные однофазные конденсаторные двигатели. — Киев: Наук. думка, 1964. — 208 с.

7. *Адаменко А.И.* Методы исследования несимметричных асинхронных машин. — Киев: Наук. думка, 1969. — 356 с.

8. *Адаменко А.И., Кисленко В.И.* Преобразование однофазного тока в трехфазный. — Киев: Техника, 1971. — 272 с.

9. *Войтех А.А., Киричек Г.М., Лир Э.В.* Асинхронные электродвигатели с регулированием скорости. — Киев: Техника, 1979. — 170с.

10. *Счастливый Г.Г.* Нагревание закрытых асинхронных электродвигателей. — Киев: Наук. думка, 1966. — 196с.

11. *Liebmann G.* Electrical Analog Method //Trans ASHE. — 1956. — V. 78. — Pp. 655—664.

12. *Постников И.М., Станиславский Л.Я., Счастливый Г.Г.* и др. Электромагнитные и тепловые процессы в концевых частях мощных турбогенераторов. — Киев: Наук. думка, 1971. — 360 с.

13. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б.* Научные проблемы турбогенераторостроения. — Л.: Наука, 1974. — 280 с.

14. *Титко А.И., Счастливый Г.Г.* Математическое и физическое моделирование электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока. — Киев: Наук. думка, 1976. — 200 с.

15. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б., Шахтарин В.Н.* Турбогенератор с использованием сверхпроводимости. — Л.: Наука, 1981. — 231 с.

16. *Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Выговский В.И.* Турбо- и гидрогенераторы при переменных графиках нагрузки. — Киев: Наук. думка, 1985. — 208 с.

17. *Беднарчук Ю.В., Езовит Г.П., Станиславский Л.Я.* и др. Исследования режимов и усовершенствование конструкций мощных турбогенераторов. — Киев: Наук. думка, 1972. — 178с.

18. *Теория и методы* расчета асинхронных турбогенераторов (Под редакцией И.М.Постникова). — Киев: Наук. думка, 1977. — 176 с.

19. *Расчет электромагнитных процессов* в роторе асинхронного турбогенератора / Сб. трудов под ред. И.М.Постникова. — Киев: Наук. думка, 1981. — 156 с.

20. *Счастливый Г.Г., Титко А.И., Федоренко Г.М., Коваленко В.П.* Надежность современных и перспективных турбогенераторов. — Киев: Наук. думка, 1978. — 224 с.

21. *Счастливый Г.Г., Голоднова О.С., Федоренко Г.Г., Фирсанов Е.П.* Развитие комплексного подхода к теоретическому анализу термомеханических процессов в статоре турбогенератора. / Препринт №559, ИЭД АН УССР. — Киев, 1988. — 36 с.

22. *Федоренко Г.Г., Голоднова О.С., Фирсанов Е.П.* Термомеханическое состояние статора турбогенератора в условиях маневренности по реактивной мощности. / Препринт № 663, ИЭД АН УССР. — Киев, 1990. — 26 с.

23. *Войтех А.А., Кисленко В.И., Малыхин Е.И., Бондаренко Ю.И.* Проблемы развития серий низковольтных двигателей общего применения в Украине // Техн. электродинамика. — 1993. — № 4. — С. 46—49.

24. *Войтех А.А., Попович А.Н.* Моделирование переходных процессов в полюсопереключаемых асинхронных двигателях. — Киев: Наук. думка, 1989. — 152 с.

25. *Лищенко А.И., Лесник В.А.* Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. — Киев: Наук. думка, 1984. — 168 с.

26. *Счастливый Г.Г., Бандурин В.В., Остапенко В.Н., Остапенко С.Н.* Математические модели теплопередачи в электрических машинах. — Киев: Наук. думка, 1986. — 184 с.

27. *Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М.* Погружные асинхронные электродвигатели. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 168 с.

28. *Счастливый Г.Г., Федоренко Г.М., Терешонков В.А., Выговский В.И.* Электрические машины с жидкостным охлаждением. — Киев: Наук. думка, 1989. — 288 с.

29. *Милях А.Н., Барабанов В.А., Двойных Е.В.* Трехстепенные электрические машины. — Киев: Наук. думка, 1979. — 312с.

30. *Титко А.И.* Электромагнитное экранирование незамкнутыми структурами в электрических машинах. — Киев: Наук. думка, 1994. — 303 с.

31. *Лищенко А.И.* Трехобмоточные асинхронные генераторы с емкостным и вентильным возбуждением для автономных энергоустановок // Техн.электродинамика. — 1995. — № 4. — С. 42—45.

32. *Антонов А.Е.* Двухкоординатные электрические машины для следящих систем. — Киев: ИЭД НАН Украины, 2000. — 190 с.

33. *Тітко В.О.* Задача синтезу магнітного поля пазового розсіяння турбогенераторів // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2002. — Ч. 3. — С. 92—95.

34. *Титко А.И., Кучинский К.А.* Взаимные перемещения сердечника и обмотки статора и их влияние на термомеханическое состояние изоляции в стационарных и динамических режимах турбогенераторов // Техн. електродинаміка. — 2005. — № 4. — С. 62—68.

35. *Титко О.І., Крамарський В.А., Зозулін Ю.В.* Возможности регулирования жидкостного охлаждения обмотки статора турбогенератора в маневренных режимах эксплуатации // Праці ІЕД НАН України. — 2003. — № 3. — С. 69—72.

36. *Титко О.І., Крамарський В.А., Крамарський О.В.* Спосіб регулювання температури обмотки електричної машини. / Патент № 60911 А. // Б. И. — 2003. — № 10.

37. *Титко А.И., Крамарский В.А., Шаломыгин М.В.* Методические средства контроля максимальных температур торцевой зоны статора турбогенераторов типа ТГВ-200 // Энергетика и электрификация. — 1999. — № 3. — С. 27—30.

38. *Титко А.И, Крамарский В.А.* Регрессионные зависимости в системе диагностики асинхронных электродвигателей. Проблемы создания новых машин и технологий // Науч. труды. Кременчугского гос. политехн. ин-та. — 2000. — вып. 2. — № 9. — С. 259—262.

39. *Титко А.И., Беспрозванный А.А., Осадчий Е.П., Молодых С.П., Кушнер С.П.* Диагностика стержней обмотки статора мощных турбогенераторов // Энергетика и электрификация. — 2003. — № 8. — С. 44—49.

40. *Счастлівий Г.Г., Виговський В.І., Виговський О.В., Безпрозваний А.О.* Аналіз динамічних теплових процесів обмотки статора потужного турбогенератора з водяним охолодженням при наявності дефектів // Техн. електродинаміка. — 2002. — № 5. — С. 43—46.

41. *Титко О.І., Худяков А.В.* Електромагнітна діагностика бандажних колець роторів турбогенератора // Праці ІЕД НАНУ. — 2004. — №3(9). — С. 60—64.

42. *Титко О.І., Ахременко В.Л.* Пристрій для виявлення дефектів на працюючому обладнанні./ Патент України № 76628. // Б.И. — 2006. — № 8.

43. *Титко А.И., Счастливый Г.Г., Осадчий Е.П., Шаломыгин М.В.* Интелектуализированная экспертная система диагностики и прогнозирования технического состояния электрических машин // III-я межд. конф. по нетрадиционным электромехан. и электрич. системам, Алушта. — 1997. — С. 1051—1058.

44. *Титко А.И., Антонович А.В., Черноусенко Г.И., Ешхренко А.И.* Концептуальные основы создания автоматизированной системы диагностики технологических режимов и оборудования энергоблоков АЭС Украины // Энергетика и электрификация. — 2005. — № 2. — С. 25—35.

45. *Титко А.И., Осадчий Е.П.* Мониторинг и диагностика

регулируемых асинхронных электродвигателей // Електропанорама. — 2003. — №1-2. — С. 22 — 23. — № 3. — С. 28—29.

46. *Титко О.І., Крамарський В.А., Кучинський К.А.* Методика контролю залишкового ресурсу та максимальної температури ізоляції обмотки статора турбогенератора в умовах експлуатації // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. — 2002. — № 1. — С. 84—88.

47. *Титко О.І.* Експлуатаційний контроль залишкового ресурсу обмоток статора електрогенераторів // Зб. наук. праць Ін-ту зварювання НАНУ. — 2006. — С. 273—276.

48. *Крамарський В.А.* Розрахункова оцінка залишкової напруги пробою ізоляції обмотки статора генераторів електростанцій // Праці Інституту електродинаміки НАНУ. — 2006. — № 1. — С. 80—82.

49. *Крамарський В.А.* Методика оперативной оценки коэффициента полезного действия турбогенератора в процессе эксплуатации // Праці ІЕД НАНУ. — 2003. — №2(5). — С. 83—84.

50. *Титко О.І., Федоренко Г.М.* Проблема енергоефективності електричних машин при генеруванні енергії і основні напрямки вирішення // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч.1. — С. 36—41.

51. *Титко О.І., Шаломигін М.В., Осадчий Є.П.* Експлуатаційний контроль енергоефективних асинхронних електродвигунів // Праці ІЕД НАНУ. Електротехніка. — 1999. — С. 125—132.

52. *Федоренко Г.М., Васьковский Ю.Н., Лившиц А.Л.* Влияние толщины листов шихтовки на основные потери в сердечнике статора турбогенераторов мощностью 120 и 200 МВт // Новини енергетики. — 2000. — № 7. — С. 53—57.

53. *Соловей В.В., Шмалько Ю.Ф., Лотоцкий М.В.* и др. Металлогидридные системы газового питания водородных энерготехнологических установок // Альтернативная энергетика и экология. — 2000. — Вып. 1. — С. 163—164.

54. *Титко В.А.* Влияние темпов инновационного развития электромашиностроения на оптимальную политику обновления электростанций. // Праці Інституту електродинаміки НАН України. — 2003. — № 2(5). — С. 101—105.

55. *Титко О.І., Счастливий Г.Г., Зозулін Ю.В., Безпрозваний А.О., Деркач А.П., Саратов В.О.* Ротор із зовнішньою демпферною системою. / Патент №7 0660(13) А. // Б.И. — 2004. — №10.

56. *Титко О.І., Виговський В.І., Виговський О.В.* Підвищення термостійкості осердя статора в асинхронних режимах при модернізації турбогенераторів потужністю 100 МВт // Техн. електродинаміка. — 2005. — №1. — С. 22—26.

57. *Саратов В.А.* Частотные зависимости параметров и характеристик турбогенераторов 300—325 МВт с различной конструкцией ротора // Техн. електродинаміка. — 2005. — № 4. — С. 58—61.

58. *Кучинский К.А., Саратов В.А.* Исследование потерь и нагревов в асинхронных режимах турбогенератора ТГВ-325 с различной конструкцией ротора // Техн. електродинаміка. — 2005. — № 5. — С. 58—61.

59. *Васьковский Ю.Н.* Оценка пределов повышения динамической устойчивости турбогенератора ТВФ-120-2 при его модернизации // Техн. електродинаміка. — 2004. — № 4. — С. 48—52.

60. *Федоренко Г.М., Васьковський Ю.М., Саратов В.О.* Підвищення динамічної стійкості турбогенераторів при їх модернізації по *d-q* технології // Новини енергетики. — 1999. — № 11. — С. 40—44.

61. *Мазуренко Л.И.* Асинхронные генераторы с вентильным и вентильно-емкостным возбуждением для автономных энергоустановок / Дис. . . . докт.техн.наук: 05.09.01. — К.: 2001. — 421 с.

62. *Афонин А.* Магнитные системы электромеханических преобразователей энергии с вариацией векторов намагниченности постоянных магнитов // Техн. електродинаміка. — 2004. — № 1. — С. 47—55.

63. *Афонин А., Гребеников В.* Новые технологии многослойных электромеханических преобразователей энергии линейного и ротационного движения. // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України — 2004. — № 2. — С. 117—120.

64. *Афонин А.* Способ повышения интенсивности магнитного поля в области преобразования энергии электрических машин. // Доповіді Національної академії наук України. — 2005. — № 2. — С. 75—80.

65. *Гребеников В. В.* Магнитные системы управляемых электрических машин с постоянными магнитами // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 2. — С. 57—60.

66. *Afonin A.* Innowacyjne technologii maszyn elektrycznych nowej generacji. // Przeglad Elektrotechniczny. — 2006. — №3. — S. 10—16.

67. *Антонов А.Е., Киреев В.Г.* Электромеханические исполнительные устройства для космических аппаратов. // Космічна наука і технологія. — 1998. — Т. 4. — № 5/6. — С. 125—128.

68. *Антонов А.Е., Киреев В.Г., Акинин К.П.* Концепция построения беспазовых электрических машин магнитоэлектрического типа и электропривода на их основе // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. — 2005. — № 2(11). — Ч. 1. — С. 99—103.

69. *Милях А.Н.* Основы теории электродинамических систем с тремя степенями свободы движения. — К.: Из-во АН УССР, 1956. — 184 с.

Надійшла 27.03.07