

УДК 621.313

д.т.н. Мілих В.І., аспірант Майстренко О.М.  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

dr. of tech. sc. V. Milykh, post-graduate stud. A. Maistrenko  
National technical university "Kharkiv polytechnic institute"

## РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ БАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ ВІРТУАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОМАШИННОЇ ЛАБОРАТОРІЇ

### Base system development results of virtual electric-machine laboratory

*Electric-machine virtual laboratory base system is the set of virtual laboratories where fundamental experiments with all base types of electric machines (transformers, direct current electric machines and asynchronous alternative current machines) could be produced. Virtual laboratory is developed based on modified classical mathematical models of electric machines and technology of virtual reality.*  
*virtual laboratory, transformers, direct current and alternative current electric machines*

Сфера застосування віртуальної реальності (ВР) вельми широка - від цікавих діалогових відеоігор до допоміжних засобів навчання лікарів хірургії, льотчиків, інженерів, астронавтів тощо. Комп'ютер здатен згенерувати "світ" розміром з наш всесвіт або ж такий мікроскопічний, як атом або молекула [1,2].

Протягом останніх кількох років у Національному технічному університеті «ХПІ» ведуться дослідження в галузі застосування технологій ВР у науці й освіті. Практичним результатом цих досліджень є віртуальна електромашинна лабораторія (ВЕМЛ), концепція якої була сформульована в [3]. На перших етапах її впровадження розроблено базовий комплекс ВЕМЛ, що включає в себе віртуальні стенди з трансформатором, двигуном постійного струму й трифазним асинхронним двигуном. Таким чином, на прикладі типових представників електромашинобудівної галузі доведена можливість і закладені основи подальшого створення інших віртуальних стендів як зі статичними пристроями, так і з обертовими машинами постійного струму та машинами змінного струму.

Метою даної роботи є представлення створеного базового комплексу ВЕМЛ, який може бути успішно застосований як середовище навчання [2], так і стати прообразом інструмента, спрямованого на впровадження у виробництво як системи контролю. Крім того, у випадку здійснення контролю через програмно-апаратний інтерфейс ВР з'являється можливість не тільки аналізувати команди керування від оператора, але й впливати на процес їхнього синтезу. Розглянута концепція [3] втілюється зараз у НТУ «ХПІ» саме як віртуальна лабораторія, орієнтована, головним чином, на досягнення навчального ефекту, але її основні принципи можуть бути успішно транспоновані для застосування на виробництві.

ВЕМЛ являє собою набір математичних моделей емуляємих пристроїв, які інтегровані у високореалістичні графічні моделі [4]. Графічні моделі адекватно реагують на зміну стану математичних моделей, покладених в основу конкретної ВЕМЛ, і навпаки - математична модель змінює свій стан відповідно до дій користувача над графічною моделлю. У навчальних віртуальних лабораторіях можуть бути реалізовані й досліджені як загальнодоступні, так і такі об'єкти й процеси, які неможливо відтворити в реальності або за умови безпеки, чи через надмірну вартість. Наприклад, ВЕМЛ дозволяє проводити експерименти, в яких свідомо передбачене руйнування досліджуваної електричної машини. Це може бути дослідження електротермічних, електродинамічних, магнітодинамічних, механічних аварій при експлуатації електричної машини. Очевидно, що ніякий відеосюжет про подібні аварії не замінить, нехай і віртуального, але експерименту по вивченню причин аварій й їхніх наслідків. Причому ВЕМЛ може бути, на відміну від реальних об'єктів, тиражована у необмеженій кількості копій, єдиною умовою використання яких є наявність комп'ютера достатнього рівня: на підприємстві, у навчальній аудиторії, вдома - де завгодно.

Розглянемо зазначені вище кілька прикладів практичної реалізації ВЕМЛ. Всі описані віртуальні лабораторії є складовими «Віртуального лабораторного практикуму», який розробляється в НТУ «ХПІ».

У віртуальних лабораторіях з дослідження трансформатора і електричних машин використовуються їхні класичні математичні моделі [5,6]. Але вони модифікуються з метою максимальної ідентичності реальним об'єктам, а також охоплення багатьох станів.

Є можливість проводити наукові й навчальні експерименти у ВЕМЛ у режимі з багатьма користувачами. У цьому випадку учасники експе-

рименту авторизуються на сервері й, потрапляючи у віртуальне середовище лабораторії, можуть здійснювати спільні дії, вибираючи при цьому самі для себе ролі при проведенні експерименту.

### **ВІРТУАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНОГО ДВОХОБМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Графічна модель віртуального стенду для дослідження однофазного двохобмоткового трансформатора подана на рис. 1.

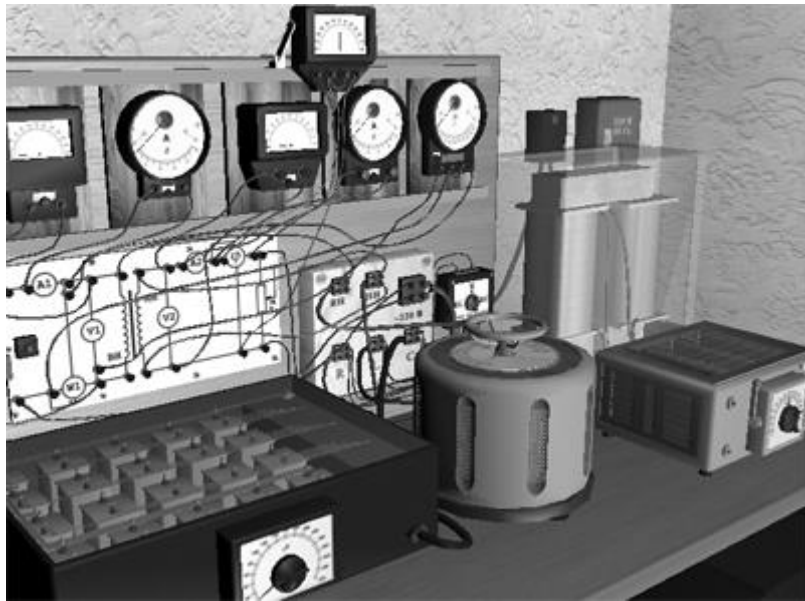
В якості вихідних даних для досліджуваного трансформатора прийняті його параметри, що відповідають звичайному переліку паспортних даних: номінальні повна потужність  $S_N$  і напруги первинної  $U_{pN}$  й вторинної  $U_{sN}$  обмоток; частота мережі  $f$ ; струм  $I_o$  і потужність  $P_o$  при неробочому ході; напруга  $U_k$  й потужність  $P_k$  при дослідному короткому замиканні.

Математична модель трансформатора заснована на використанні класичної Т-образної схеми заміщення [5] - це докладно подане у [7]. У лабораторній роботі передбачене проведення всіх практично необхідних у реальному навчальному процесі експериментів із трансформатором: режимів неробочого ходу й дослідного короткого замикання; робочого режиму при регульованому навантаженні різного характеру.

Таким чином, можуть бути «експериментальним шляхом» визначені параметри й робочі характеристики трансформатора. Останні можна побудувати на дошці малювання, інтегрованої у віртуальний простір лабораторії. У віртуальну модель лабораторного стенда включені стрілочні прилади (рис. 1): амперметри, вольтметри, ватметр і фазометр. Їхні показання ще дублюються на екрані монітора цифрового мультиметра, що знаходиться усередині віртуального простору, поруч із лабораторним стендом. Передбачено можливість зміни типу навантаження: активне/активно-індуктивне/активно-ємнісне. Навантажувальний реостат, індукційний регулятор, магазин конденсаторів представлені у вигляді високореалістичних тривимірних моделей. Моделюються аварійні режими: раптове коротке замикання, що приводять до наочного ушкодження трансформатора, відключення автомата, перегорання плавких запобіжників, імітація ударів струмом при неприпустимій поведінці із включеним стендом. У випадку перевищення припустимого стану, наприклад, за температурою в обмотках трансформатора або в наван-

таженні, моделюються різні аварійні ситуації - електродинамічні деформації при коротких замиканнях при високих струмах, перегрів та задимлення, що супроводжується характерними акустичними ефектами.

Про ступінь «природності» окремих деталей і загального виду ВЕМЛ, що претендує на те, щоб зватися «віртуально реальна», складно судити по чорно-білому зображенню на рис. 1: його можна прийняти за фотографію. У дійсності це кольоровий «тривимірний» динамічний об'єкт, що нагадує сучасні комп'ютерні ігри.



*Рис. 1. Схема та прилади віртуального стенду для дослідження однофазного двохобмоткового трансформатора*

### **ВІРТУАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Графічна модель віртуального стенду для дослідження двигуна постійного струму (ДПС) подана на рис. 2.

Реалізований варіант ДПС із незалежним збудженням. Його номінальні параметри, а також опори обмоток, характеристика намагнічування, вплив реакції якоря вважаються заданими. Відповідна математична модель даного ДПС подана в [8] і вона відповідає класичним уявленням про нього [5,6], але з деякими уточненнями, що зберігають реалістичні для ДПС нелінійності магнітних характеристик.

Регульованим навантаженням ДПС слугує кероване електромагнітне гальмо. У результаті розрахунку за алгоритмом, побудованим на основі математичної моделі, на прилади віртуального стенда (рис. 2) можуть бути видані значення наступних величин:  $I_a$  - струм якоря;  $M$  - момент на валу;  $n$  - частота обертання, яка вимірюється за допомогою тахогенератора й тахометра;  $U$ ,  $U_a$  - напруги джерела і на вхідних затискачах якорного кола ДПС, струм збудження  $I_E$ .

Використовуючи «експериментальні» значен-

ня величин, «обмірювані» на віртуальному стенді, можна додатково визначити: потужності корисну:  $P = \frac{M n}{9,55}$  і споживану ДПС із мережі:

$$P_{in} = U \cdot I_a; \text{ ККД: } \eta = \frac{P}{P_{in}}.$$

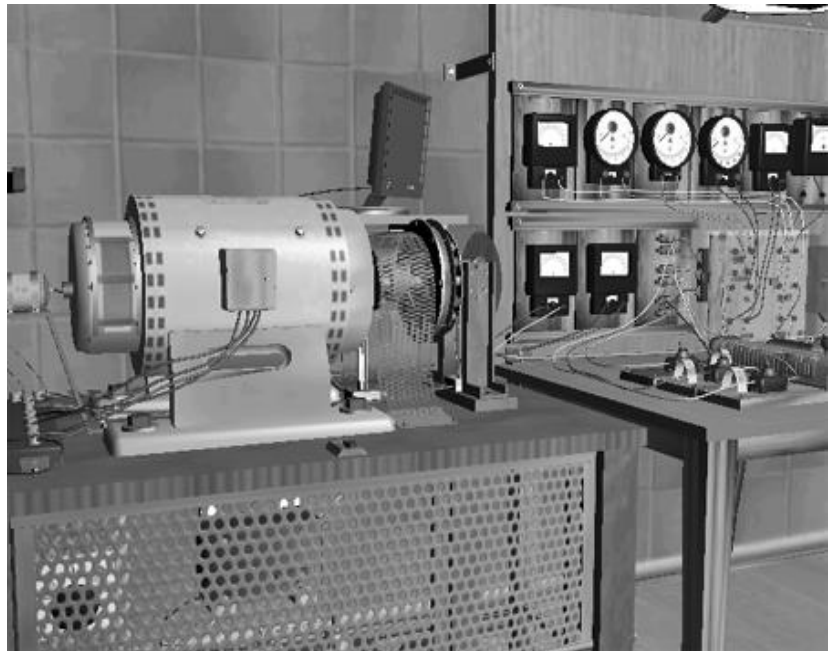
Всі віртуальні дії, виміри й обчислення дають можливість побудувати робочі характеристики ДПС:  $I_a(P)$ ;  $\eta(P)$ ;  $M(P)$ ;  $n(P)$ , а також механічну характеристику  $n(M)$ .

Варіюванням вхідної напруги  $U$ , струму збудження  $I_E$ , опору  $R_{reg}$  додаткового реостата у якорному колі, при заданому моменті обертання на валу, можна вивчити регульовальні властивості ДПС і побудувати різні його регульовальні характеристики [5,6].

Подальше вдосконалення математичної моделі орієнтовано на використання чисельно-польових методів розрахунку магнітних характеристик ДПС. Ведуться дослідження з оптимізації алгоритмів розрахунку чисельно-польових методів для використання в масштабі реального часу.

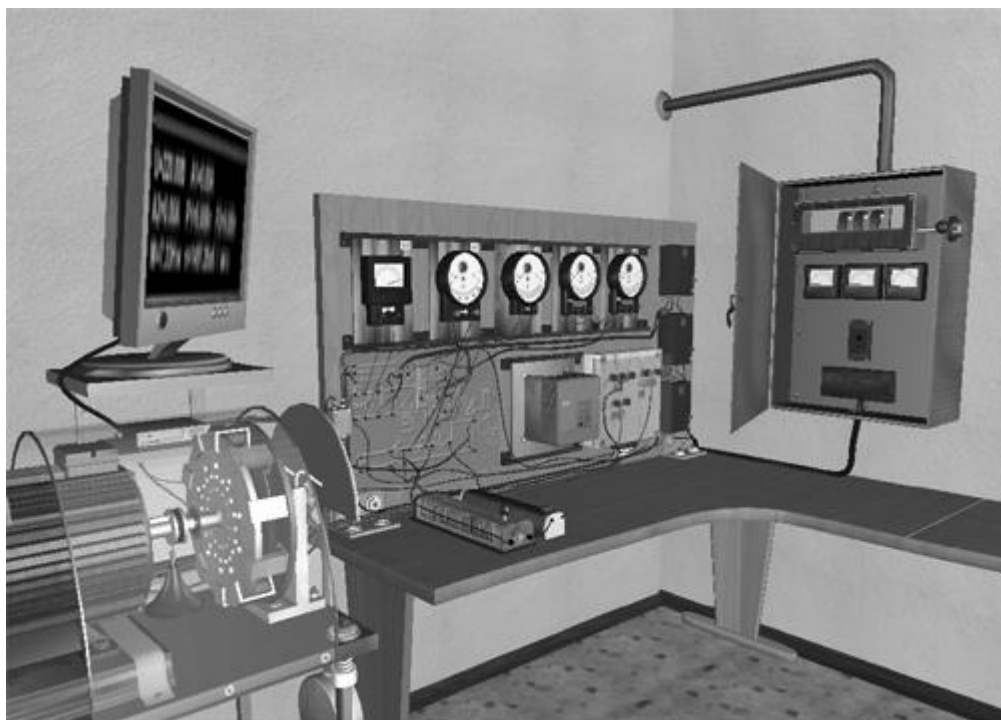
### **ВІРТУАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГУНА**

Графічна модель віртуального стенду для дослідження асинхронного двигуна (АД) подана на рис. 3.



*Рис.2. Приладова панель та стіл віртуальної лабораторії для дослідження ДПС*

Через те, що процесорний час, потрібний для підтримки адекватної роботи інтерактивної графічної моделі віртуального АД великий, - необхідний строгий алгоритм розрахунку його робочих характеристик на основі заданих незмінних і змінюваних параметрів. Відповідно до [5,6], для одержання робочих характеристик використовується Г-образна схема заміщення приведенного АД. Тому що елементи цієї схеми є лінійні, то відповідна математична модель має відомий рівень наближеності. Через це математичну модель та алгоритм можна вважати структурами першого рівня точності. Хоча зазначимо, що на відміну від [5,6], тут все-таки вводяться уточ-



*Рис.3. Приладова панель та стіл віртуальної лабораторії для дослідження АД*

нюючі розрахункові елементи при визначенні деяких параметрів АД. Надалі математична модель й, відповідно, алгоритм можуть бути уточнені більш значно на основі введення нелінійних функцій ряду параметрів залежно від стану електромагнітної системи АД.

Використовуються відомі вихідні дані: номінальна потужність  $P_N$ , фазна напруга  $U_{sN}$ , і струм  $I_{sN}$  статора, кількість пар полюсів  $p$ , кількість фаз обмотки статора  $m_s$ , частота живлячої напруги  $f$ , активний опір фази статора  $R_s$ , індуктивний опір розсіювання статора  $X_{\sigma s}$ , приведені опори ротора: активний  $R_r'$  і індуктивний розсіювання  $X_{\sigma r}'$ , втрати потужності магнітні  $P_{mag}$ , механічні при неробочому ході  $P_{mech}$ , втрати додаткові в номінальному режимі  $P_{ad}$ , коефіцієнт вторинного приведення струму ротора  $c_1$ , реактивна  $I_{react}$  і активна  $I_{act}$  складові струму неробочого ходу, номінальне ковзання  $s_N$ .

Метою проекту даної віртуальної лабораторії є розробка й апробація математичної моделі трифазного АД з короткозамкненим ротором, що призначається для віртуального лабораторного стенду (рис. 3). Невід'ємною особливістю математичної моделі [5,6], що реалізується у віртуальному середовищі лабораторії у реальному часі повинна бути її висока швидкодія.

Використовувана у віртуальній лабораторії математична модель асинхронного двигуна оптимально підходить для роботи в умовах дефіциту процесорного часу, що витрачається у ВЕМЛ в основному на підготовку графіки.

Також розглянута математичну модель можна застосовувати в системах контролю реального часу, де теж необхідна висока швидкість обчислень стану математичної моделі, наприклад, - у керуючих мікроконтролерних системах.

Наприкінці можна зауважити, що у цілому представлена розробка спрямована на створення й впровадження технологій ВР та комп'ютерного обчислювання для побудови повноцінної віртуальної електромашинної лабораторії, що повністю замінює або доповнює реальний практикум, більша частина якого звичайно вимагає модернізації за різними причинами. ВЕМЛ дозволяє поспівати «у ногу» із прогресом і впроваджувати всі нові й нові елементи в лабораторію, роблячи її тим самим передовою й потрібною як для студентів, так і для науковців, які можуть здійснювати в ній як методичні, так і наукові експерименти. Віртуальна електромашинна лабораторія не вимагає обслуговування й легко налаштовується під вимоги конкретного користувача. Значимі вихідні параметри досліджуваних електротехнічних пристроїв можна змінювати, тим самим уникаючи постійного дуб-

лювання отримуваних результатів, що є властивістю реальних лабораторій.

Згодом накопичується бібліотека компонентів і математичних моделей до них, що відкриває перспективи створення відкритого проекту обміну досвідом між університетами світу. Користування віртуальною лабораторією можливо через Internet як в однокористувачевому, так і багатокористувачевому режимах.

Перспектива створення відкритого проекту виявляє необхідність у стандартизації складових віртуальної лабораторії, що в даний момент є одним з напрямків наукової діяльності авторів статті.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Byrne C. *Virtual Reality and Education*. University of Washington, Human Interface Technology Laboratory of the Washington Technology Center, Seattle, WA. Technical Publication R-93-6. (<http://citeseer.ist.psu.edu/byrne93virtual.html>).
2. Hoffman H, Vu D. *Virtual reality: teaching tool of the twenty-first century*. *Academic Medicine.*, 72:1076-1081.
3. Мильх В.И., Майстренко А.М. *Концепция электромашинной виртуальной лаборатории и первые этапы ее воплощения // Межведомственный научно-технический сборник «Электромашиностроение и электрооборудование»*. – Киев: «Техника», 2006.-Вип.66.-С.217-218.
4. Мильх В.И., Майстренко А.М. *Виртуальная реальность и принципы разработки виртуальной лаборатории трансформаторов и электрических машин // Электротехника і електромеханіка.-2007.-№2.-С.74-81*.
5. Вольдек А.И. *Электрические машины*. Л.: Энергия, 1978.- 832 с.
6. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клоков Б.К. и др. *Проектирование электрических машин*. / Под ред. И.П.Копылова - М.: Энергия, 1980.- 496 с.
7. Мильх В.И., Майстренко А.М. *Графоматематическая модель однофазного трансформатора и её программно-виртуальная реализация*. // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Сборник научных трудов. Тематический выпуск. Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. - Харьков: НТУ «ХПИ». - 2006. - №35.- С.79-86.
8. Мильх В.И., Майстренко А.М. *Виртуальный стенд для исследования двигателя постоянного тока // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету: Наукові праці КДПУ.- Кременчук: КДПУ, 2006.- Вип.3/2006(38). Частина 1.- С.149-151*.