
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ МОДЕЛЮВАННЯ

doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.40.04.055>

УДК 621.3.51

Ю.Г. Куцан, д-р техн. наук, **В.О. Гурєєв**, канд. техн. наук,
Є.М. Лисенко, аспірант
Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України
(Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15,
тел. +380 444249161, e-mail: kutsan.ug@ukr.net)

Моделювання і розробка адаптивної автоматизованої системи конструювання сценаріїв протиаварійних тренувань

Розглянуто склад і структура підсистем моделювання режимних тренажерних систем в енергетиці та теоретичні питання технології конструювання різних сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань. Описано основні етапи побудови навчально-методичної бази процесів тренажерної підготовки за допомогою навчального дистанційного режимного тренажера. Запропоновано методи зберігання інформації та візуалізації результатів моделювання для дистанційних режимних тренажерів. Визначено можливості використання конструктора сценаріїв протиаварійних тренувань для підвищення кваліфікації у складі розподіленої мережі центрів підготовки персоналу.

Ключові слова: режимні тренажери, оперативні перемикання, сценарії протиаварійних тренувань, ключові компетентності.

Нині в енергетиці України існує велика потреба у розробці і використанні нових режимних тренажерів для стійкого формування, контролю і підтримки компетентностей оперативно-диспетчерського персоналу, включаючи методи швидкої ліквідації аварій. Це зумовлено швидкою моральною і фізичною деградацією енергетичного устаткування і ускладненням режимів його роботи в сучасних умовах.

Створення повнофункціональних режимних тренажерів для персоналу різних рівнів ієрархії управління енергетикою є надзвичайно складним науково-технічним завданням. Тренажерна система зазвичай включає наступні підсистеми:

- управління розподіленими базами даних;
- моделювання режимів роботи енергосистем;
- візуалізації результатів моделювання;

© Ю.Г. Куцан, В.О. Гурєєв, Є.М. Лисенко, 2018

людино-машинного інтерфейсу і автоматизованого конструювання сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань.

Остання підсистема повинна забезпечити швидке створення сценаріїв протиаварійних тренувань з використанням матеріалів розслідування прогнотзованих аварій або таких, що вже сталися [2]. Набір таких сценаріїв складатиме методологічну основу учбово-тренажерної бази системи тренажерної підготовки, що розвивається.

Метою даного дослідження є аналіз існуючих підходів до створення сценаріїв тренувань і розробка нової системи автоматизації проектування сценаріїв протиаварійних тренувань для дистанційних веб-орієнтованих режимних тренажерів на основі інтегрованої системи серверів додатків і систем управління базами даних (БД), включаючи віртуальні [1].

Пропонована система автоматизації призначена для організації повноцінного навчально-методичного забезпечення процесу тренажерної підготовки персоналу як в умовах навчально-тренувальних центрів, так і безпосередньо на робочих місцях. Передбачається використання змішаної (очно-заочної) форми навчання в цілодобовому режимі для чисельного оперативно-диспетчерського персоналу. Систему автоматизації проектування сценаріїв протиаварійних тренувань реалізовано з урахуванням особливостей розподіленого середовища моделювання енергосистем. До складу постачання системи автоматизації входять набори ознайомлювальних дистанційних курсів за тематикою адаптивних інтерактивних людиномашинних інтерфейсів і тренажерної підготовки персоналу із застосуванням сучасних інформаційних технологій та інтернету [3].

Моделі зберігання оперативної інформації. Важливим завданням системи тренажерної підготовки оперативно-диспетчерського персоналу є розробка методів максимально повного подання існуючих знань про предметну область технології оперативних перемикачів в електричних мережах і ефективне застосування цих знань для формування навичок, що відповідають ключовим компетентностям. Це також стосується питань технології оперативних перемикачів в аварійних режимах електричних мереж і безпечної роботи з електроустановками.

Основними комутаційними апаратами на підстанціях електричних мереж є вимикачі, роз'єднувачі, короткозамикачі, відокремлювачі, трансформатори, системи шин та ін. Порядок і регламент комутацій визначено в службових інструкціях і заздалегідь підготовлених штатних програмах перемикачів. Проте на практиці при експлуатації стан комутаційних апаратів може значно відрізнятися від стандартного. Для визначення операцій, потрібних для введення устаткування в ремонт або виведення з ремонту, використовують спеціальні бланки оперативних перемикачів, в яких

враховано реальний стан устаткування на момент перемикавання. Навіть для невеликих енергопостачальних організацій потреба в створенні і використанні бланків оперативних перемикань обчислюється десятками тисяч на рік. Нині ручна підготовка бланків перемикань спричиняє появу великої кількості помилок. Тому спрощення і автоматизація процесу підготовки бланків оперативних перемикань в сучасних умовах є актуальним завданням для експлуатаційного персоналу підстанцій. Цим питанням присвячена велика кількість публікацій в нашій країні і за кордоном [1—3]. У багатьох дослідженнях для таких цілей використовують дерева оцінки ситуацій, плани дій і подібні алгоритми аналізу діяльності персоналу [4, 5].

Надійність роботи системи «людина — енергетичний об'єкт» визначається рівнем розуміння персоналом його виробничої діяльності і умінням утворювати в процесі навчання уявну модель об'єкту управління [4]. Уявна модель формується за допомогою інтеграції технологічної (суб'єктивне уявлення людини про структуру і топологію устаткування), функціональної (створення людиною в процесі навчання образів існуючих причинно-наслідкових взаємозв'язків між можливими змінами і порушеннями в технологічному процесі), причинно-наслідкової (створення образів існуючих причинно-наслідкових взаємозв'язків між можливими змінами і порушеннями в технологічному процесі) та інших моделей [5]. Вказані моделі діяльності складають основу алгоритму процесу створення пропонуваної навчально-методичної бази системи тренажерної підготовки, включаючи структуру мінімальної бази знань для конструювання сценаріїв тренувань.

Одне з важливих питань, пов'язаних з технологією конструювання сценаріїв тренувань, — міра повноти наборів експлуатаційних ситуацій, що є основою будь-якої програми тренажерної підготовки персоналу. Досвід поточної експлуатаційної діяльності персоналу свідчить про важливість особистого досвіду керівника тренування і навчального персоналу при плануванні програми навчання. Важливо застосовувати індивідуальний підхід при навчанні персоналу, забезпечуючи можливість індивідуального вибору контенту і плану програми тренажерної підготовки.

Відомі два основні методичні підходи до формування уявної моделі об'єкту управління [5—7].

Перший — алгоритмічний — забезпечує перетворення оперативних знань і рішень у відповідні навички. Основою цього методу навчання є алгоритмічні способи опису експлуатаційних подій: дерева оцінки ситуацій і плани дій. Деревами оцінки ситуацій є графи (карти) усіх можливих умов і шляхів виникнення аварій і порушень у роботі устаткування.

У реальній експлуатаційній ситуації необхідно знати усі шляхи і уміти знайти один або декілька правильних. Для цього використовують плани дій у вигляді реакції на можливі збурення. Плани дій — це графи (карти) шляхів досягнення мети за допомогою наявних засобів і з урахуванням існуючих обмежень. Проте алгоритмічний підхід обмежує можливості розвитку самостійного оперативного мислення в нестандартних ситуаціях.

Другий підхід називають таким, що породжує ситуації. Він дозволяє генерувати різноманітні умови і можливості варіантів розвитку аварійних ситуацій самому інструкторові або персоналу, що тренується, і моделювати будь-які складні екстремальні збурення, що викликають виникнення і розвиток аварій. Вважається, що чим неймовірніше поєднання подій, тим більша ефективність цього методу.

Основною відмінністю запропонованого підходу від описаних вище є те, що керівник тренування або навчання самостійно пропонує умови виникнення аварій і подій. Це дозволяє зосередити головну увагу на формуванні, контролі і підтримці навиків мислення у персоналу і здатності прогнозувати шляхи розвитку аварійних подій. Генерація можливих або прогнозованих варіантів ситуацій значною мірою доповнює алгоритмічний підхід.

Нині для моделювання і дослідження режимів роботи енергосистем широко використовують так звані схеми заміщення енергетичного устаткування, до яких належать лінії електропередачі, генератори, трансформатори, вимикачі, роз'єднувачі та ін. За допомогою моделей окремих елементів утворюють великі об'єкти енергосистем, включаючи транзитні розподільні відкриті і закриті підстанції, теплові, атомні і гідроелектростанції, вітрові, сонячні та інші джерела енергії. Із великих енергосистем утворюються енергооб'єднання (ЕО), призначені для забезпечення надійної статичної і динамічної стійкості. Методам дослідження великих енергосистем присвячено багато робіт [7—10], які актуальні і сьогодні. Для моделювання великих ЕО пропонується використовувати розподілене середовище і кластерні БД. На відміну від існуючих точкових методів розрахунку режимів енергосистем запропоновано перехід до безперервної або дискретної системи виконання розрахунків залежно від цілей, постановки завдань і вимог до результатів моделювання.

Розроблена модель зберігання оперативної інформації про параметри об'єктів електроенергетичних систем (ЕЕС) має вигляд віртуальних реляційних таблиць, які містять інформацію про вузли і гілки в локальних або віддалених БД. Така інформація про модель енергосистем або їх об'єднань зі спеціальною вбудованою системою тригерів сповіщення дозволяє мінімізувати загальний час реакції тренажерної системи на збурення в різних місцях.

Початковою інформацією для роботи режимної тренажерної системи є достовірна і адекватна інформація про модель ЕЕС або ЕО. Режим роботи ЕЕС у будь-який момент часу, якщо відомі струми вузлів, описується системою рівнянь

$$[\dot{I}_s(t)] = [\dot{Y}_{ss}] \cdot [\dot{U}_s(t)], \quad (1)$$

де $[\dot{Y}_{ss}]$ — матриця вузлової провідності електричної мережі; $[\dot{U}_s(t)]$ — вектор-стовпець напруги вузлів; $[\dot{I}_s(t)]$ — вектор-стовпець відомих струмів вузлів; s — кількість вузлів. Якщо відомі або задані потужності вузлів, то формулу (1) подають у вигляді добутку скалярного вектору струмів вузлів $[\dot{I}_s(t)]$ на спряжений вектор напруги вузлів $[\dot{U}_s(t)]$:

$$([\dot{Y}_{ss}] \cdot [\dot{U}_s(t)]), [\dot{U}_s(t)] = [\dot{S}_s(t)], \quad (2)$$

де $[\dot{S}_s(t)]$ — вектор заданих потужностей вузлів.

Для розв'язку системи (2) зазвичай використовують різні варіанти методу Ньютона або Гауса, рідше — ітераційні методи визначення контурних струмів. Основна вимога до цих методів — забезпечити максимально короткий (комфортний) час отримання правильних рішень, прийнятих для ухвалення диспетчером по результатам моделювання. Згідно з цією вимогою використано багатоопорний метод розрахунку контурних струмів [2], надзвичайно зручний для моделювання великих розподілених ЕЕС. Основна ідея методу полягає в ітераційній процедурі еквівалентної заміни замкнутої електричної мережі розімкненою, режим якої повністю співпадає з режимом початкової електричної системи. Реалізація контурної розрахункової моделі для розрахунку режимів електричної мережі передбачає автоматичне виділення в розрахунковій схемі мережі дерев і хорд.

Загальний час отримання кінцевого результату залежить від місця розташування БД (локальне або віддалене) і способу зберігання результатів (у оперативній пам'яті або у віддалених БД). Для прискорення розв'язку нелінійних систем рівнянь використовують здебільшого оперативну або локальну пам'ять. Проте для моделювання великих ЕЕС доводиться використовувати тільки розподілені системи управління БД, що, на жаль, може збільшити час реакції моделюючої підсистеми тренажера і підсистеми відображення результатів моделювання.

Технологія комутаційних перемикачів в електричних мережах реалізується за спеціальними програмами оперативних перемикачів (затвердженими керівництвом енергетичного підприємства) для нормальних умов експлуатації підстанцій і мереж. Програми перемикачів, які щорічно обов'язково переглядаються, є основою для створення протиаварійних тренувань, що проектуються з використанням спеціально розробленого

конструктора (редактора) різноманітних сценаріїв аварій і порушень в роботі підстанцій і електричних мереж.

Програми перемикачів, які обов'язково попередньо створюють для кожної підстанції, є унікальними, їх кількість для підстанцій напругою 110/35/10 кВ обчислюється сотнями. Кількість операцій (перемикачів або дій) в кожній програмі коливається приблизно в діапазоні від 20 до 100. На даний час в Україні функціонують близько 30 енергопостачальних організацій і кожна з них має у своєму складі приблизно 600 підстанцій такою напругою. Велика кількість програм і операцій перемикачів часто призводить до помилок і зумовлює необхідність автоматизації процесів розробки бланків оперативних перемикачів.

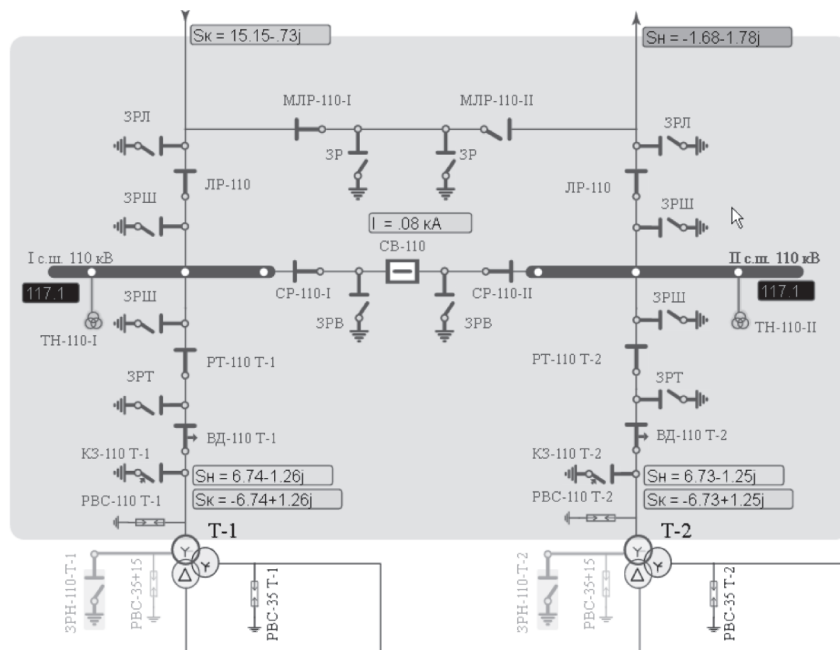
Програми перемикачів можуть бути записані у вигляді формальної системи логічних правил перемикачів типу «виконати», «відключити», «оглянути» та ін. Це дозволяє створити мінібазу знань про перевірки умов виконаних або пропонованих операцій у вигляді системи простих правил «якщо щось сталося або виконано, то результат буде наступним», яка в подальшому використовується для створення сценаріїв протиаварійних тренувань і бланків оперативних перемикачів.

Пропонується три типи правил діалогового формування мінібази знань:

- перший — операції з наявним устаткуванням на підстанції;
- другий — з телефонними переговорами персоналу;
- третій — з усіма іншими операціями, не пов'язаними з перемикачними, наприклад виклик пожежної машини.

Фрагмент конструктора із варіантами операцій

Номер елемента сценарію	Приналежність	Правило	Назва дії	Стан елемента	Назва елемента	Диспетчерська назва елемента
64	Автор сценарію	62	Змінити стан	Ремонтний	Вимикач	ПК 10 ТВП-1
65	" "	63	" "	"	Релейна панель	АВ 0,4 ТВП-1
66	Користувач	55	" "	"	Вимикач	ПК 10 ТВП-1
		Включити автомат 0,4 кВ ТВП-1 у робоче положення				
67	Тренажерна система	32	" "	Контрольний	"	ПК 10 ТВП-1
		Включити візок ПК 10 ТВП-1 у робоче положення				



Параметри режиму принципової схеми підстанції 110 кВ

Передбачено можливість формування переліку необхідних операцій від імені персоналу, що навчається, і від імені моделюючого комплексу тренажера, що дозволяє моделювати роботу релейного захисту і автоматики та зовнішніх збурень або відмов устаткування в заданий час і залежно від ситуації, що склалася.

В таблиці наведено фрагмент редактора, який відображає типову структуру правил, а саме номер елемента, назву операції, місце розташування та назву комутаційного обладнання, потрібну дію. На рисунку показано фрагмент схеми типової підстанції напругою 110/35/10/0,4 кВ, яка використовується в тренажерному навчанні. Реалізовано можливість виділення окремих груп обов'язкових послідовностей дій, передбачених в програмах перемикачів, за допомогою введення типів умовних або обов'язкових поточних операцій з комутаційним устаткуванням.

Висновки

Систему автоматизації процесів конструювання, редагування і створення сценаріїв штатних і протиаварійних тренувань розроблено для використання в науково-навчальних віртуальних тренажерних центрах сучасної професійної електронної системи навчання. Запропонована система значно прискорює процеси розробки і конструювання сценаріїв протиаварійних тре-

нувань. Середовище розподіленого моделювання забезпечує широкі можливості для ефективного використання нової сучасної електронної системи роботи з персоналом і дозволяє перейти до розробки єдиних стандартів навчання і тренажерної підготовки персоналу в енергетиці України. Об'єднання можливостей сучасних методів електронного навчання та інструментальних програмних засобів розподіленого віртуального моделюючого середовища дозволяє отримати нову якість системи підвищення кваліфікації і тренажерної підготовки оперативного персоналу підстанцій та енергосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аветисян Е.В., Гурєєв В.О., Сангінова О.В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу ОЕС України // Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2016, 1 (124), с. 101—107.
2. Гурєєв В.О., Сангінова О.В. Моделювання та вивчення режимів повномасштабного тренажера для енергетичних систем України. Друга міжнародна конференція з інтелектуальних енергетичних систем (IEPS'2016). 2016, Червень 7-11, Київ, Україна, с. 97—100.
3. Гурєєв В.А., Сангінова О.В. Построение обучающего дистанционного тренажера для подготовки персонала энергетической отрасли // 36. наук. праць Ін-ту електродинамики НАН України. К.: ІЕД НАНУ, 2017, Вип. 48, с. 52—58.
4. Галактионов А.И. Основы инженерно-психологического проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами. М.: Наука, 1978.
5. Чачко А.Г. Подготовка операторов энергоблоков. М.: Наука, 1986.
6. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972, 544 с.
7. Дозорцев В.М., Агафонов Д.В., Назин В.А. и др. Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор // Автоматизация в промышленности, 2015, № 7, с. 8—20.
8. Annette Kluge, Jurgen Sauer, Kerstin Schuler et al. Designing training for process control simulators: a review of empirical findings and current practices // Theoretical issues in ergonomics science, 2009, Vol. 10, No. 6, p. 489—509.
9. Донской А.Н. Тренажеры на базе ЭВМ для оперативного персонала ТЭЦ// Энергетик, 1995, № 5, с. 28—34.
10. Мировой рынок компьютерных тренажеров для обучения операторов: тенденции, вызовы, прогнозы (PDF Download Available). Available from: https://www.researchgate.net/publication/292960505_Mirovoj_rynok_komputernyh_trenazero_v_dla_obucenia_operatorov_tendencii_vyzovy_prognozy.

Отримано 15.05.18

REFERENCES

1. Avetisian, E.V., Gurieiev, V.O. and Sanginova, O.V. (2016), "Development and application of virtual hierarchical structures for modeling of modes, teaching and training of UES staff of Ukraine", *Visnyk Vinnytskogo politechnichnogo instytutu*, Vol. 1(124), pp. 101-107.
2. Gurieiev, V.O. and Sanginova, O.V. (2016), "Simulation and study of modes for full-scale mode simulator for Ukrainian energy systems", *Proceedings of the 2nd International Conference on Intellectual Energy and Power Systems (IEPS'2016)*, June 7-11, Kyiv, Ukraine, pp. 97-100.

3. Guriev, V.A. and Sanginova, O.V. (2017), "Construction of a training remote simulator for the training of personnel in the energy sector", *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu elektodynamiky NAN Ukrainy*, no. 48, pp. 52-58.
4. Galaktionov, A.I. (1978), *Osnovy inzhenerno-psikhologicheskogo proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Fundamentals of engineering and psychological design of automated process control systems], Nauka, Moscow, USSR.
5. Chachko, A.G. (1986), *Podgotovka operatorov energoblokov* [Training of power unit operators], Nauka, Moscow, USSR.
6. Kron, G. (1972), *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam (diakoptika)* [Investigation of complex systems by parts (diacoptics)], Nauka, Moscow, USSR.
7. Dozortsev, V.M., Agafonov, D.V., Nazin, V.A. et al. (2015), "Computing training of operator: nontransient urgency, new potentialities, human factor", *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, no. 7, pp. 8-20.
8. Kluge, A. et al. (2009), Designing training for process control simulators: a review of empirical findings and current practices, *Theoretical issues in ergonomics science*, Vol. 10, no. 6, pp. 489-509.
9. Donskoy, A.N. (1995), Computer-based simulators for operative personnel of TEP, *Energetik*, no. 5, pp. 28-34.
10. The world market of computer simulators for operator training: trends, challenges, forecasts (PDF Download Available), available at: https://www.researchgate.net/publication/292960505_Mirovoj_rynok_komputernyh_trenazherov_dla_obucenia_operatorov_tendencii_vyzovy_proгноzy.

Received 15.05.18

Ю.Г. Куцан, В.А. Гуреев, Е.Н. Лысенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ СЦЕНАРИЕВ ПРОТИВОАВАРИЙНЫХ ТРЕНИРОВОК

Рассмотрены состав и структура подсистем моделирования режимных дистанционных тренажерных систем для подготовки оперативно-диспетчерского персонала в энергетике и теоретические вопросы технологии конструирования сценариев штатных и противоаварийных тренировок. Описаны основные этапы построения научно-методической базы процессов тренажерной подготовки с помощью учебного дистанционного режимного тренажера. Предложены методы сбережения информации и визуализации результатов моделирования для дистанционных режимных тренажеров. Определены возможности использования конструктора сценариев противоаварийных тренировок для повышения квалификации в составе распределенной сети центров подготовки персонала.

К л ю ч е в ы е с л о в а: режимные тренажеры, оперативные переключения, сценарии противоаварийных тренировок, ключевые компетентности.

Yu.G. Kutsan, V.O. Gurieiev, Ye.M. Lysenko

MODELING AND DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE AUTOMATED SYSTEM FOR CREATING THE EMERGENCY TRAINING SCENARIOS

Composition and structure of subsystems of modeling remote simulators for training operational and dispatching personnel in power industry and theoretical problems of technology for making standard and emergency training scenarios have been considered. Main stages of constructing the scientific and methodical base of training with the help of trainers and remote simulators have been described. The methods for data integrity and visualization of modeling results for remote regime simulators have been proposed. The possibilities of using the constructors of scenarios of emergency trainings for raising the level of personnel skills in the distributed network of centers for personnel training have been determined.

Key words: operational simulators, operative changeover, emergency training scenarios, key competencies.

КУЦАН Юлій Григорович, д-р техн. наук, заст. директора з наукової роботи Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. У 1966 р. закінчив Київський політехнічний ін-т. Область наукових досліджень — моделювання технологічних процесів в енергетичній галузі.

ГУРЄЄВ Віктор Олександрович, канд. техн. наук, докторант Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1974 р. закінчив Київський політехнічний ін-т. Область наукових досліджень — моделювання режимів роботи великих електроенергетичних систем і енергооб'єднань для комп'ютерних тренажерних систем.

ЛИСЕНКО Євген Миколайович, аспірант Ін-та проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 2002 р. закінчив Національний авіаційний університет. Область наукових досліджень — моделювання методів автоматизації комп'ютерних тренажерних систем.