

УДК 621.311.22:004.9

ПОСТРОЕНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ПО УПРАВЛЕНИЮ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

М. Я. Брагинский, Д. В. Тараканов

Сургутский государственный университет, mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru

В представленной работе рассмотрена адаптивная архитектура многофункционального компьютерного тренажера, решающего задачу аналитико-имитационного моделирования технологического процесса, обучения и анализа эффективности обучения человека-оператора. Математическая модель компонентов моделируемой системы настраивается с учетом выбранного режима работы тренажера, что обеспечивает баланс временных параметров компьютерного тренажера. Данная задача является особенно актуальной при моделировании параллельных разнородных процессов, протекающих в автоматизированных системах управления. Особенностью предлагаемой математической модели человеко-машинной системы является возможность ее адаптации с помощью компонентов нейросетевой идентификации как объекта управления, так и результатов действий обучаемого, что обеспечивает гибкость функционирования компьютерного тренажера. В качестве примера построения аналитической модели приведена динамическая модель нагрева теплоносителя. Предлагается подход построения профессионального тренажера, в котором к традиционным задачам обучения и контроля добавляется оценка эффективности функционирования человеко-машинной системы в виде численных показателей, связанных с использованием имеющихся ресурсов. Такие оценки можно представить графически в виде диаграмм показателей качества и динамики участия группы операторов. Наличие таких показателей качества работы компьютерного тренажера и обучаемого персонала позволяют повысить эффективность функционирования компьютерного тренажера. Рассмотрена классификация и принципы построения многофункционального компьютерного тренажера для обучения персонала.

Ключевые слова: компьютерный тренажер, человек-оператор, модель.

CONSTRUCTION OF MULTIFUNCTIONAL SIMULATOR FOR CONTROLLING HEAT AND POWER SYSTEM

M. Ya. Braginsky, D. V. Tarakanov

Surgut State University, mick17@mail.ru, sprtdv@mail.ru

In this paper the adaptive architecture of a multifunctional computer simulator is considered. This simulator solves the problem of analytical and simulation modeling of the technological process, training and analysis of the training efficiency of the human operator. The mathematical model of the components of the simulated system is adjusted taking into account the selected operating mode of the simulator that provides a balance of time parameters for the computer simulator. This task is especially relevant in the modeling of parallel dissimilar processes occurring in automated control systems. A feature of the proposed mathematical model of the human-machine system is the possibility of its adaptation by means of an artificial neural network (ANN). The ANN provides an identification of the control object and the results of the operator's actions. As an example of constructing an analytical model, a dynamic model for heating the coolant is given. The paper proposes the approach to constructing a simulator in which an evaluation of the effectiveness of the human-machine system is carried out. Numerical indicators of resource consumption are used. Such evaluation can be represented by a diagram form (quality indicators and the dynamics of some operators' participation). The availability of such performance indicators allows improving

the efficiency of the computer simulator. The paper presents a classification and principles of multifunctional computer simulator development for personnel training.

Keywords: computer simulator, human-operator, model.

При разработке современных сложных автоматизированных комплексов и систем возникает множество задач, среди которых наиболее трудоемкой является задача обеспечения высокой эффективности взаимодействия человека-оператора (или группы операторов) с автоматизированной частью систем [1–5].

Оператор часто принимает сложные, ответственные решения по управлению технологическим процессом. Данные задачи в ряде случаев носят слабо формализованный характер, особенно в случае противоаварийного и восстанавливающего управления. От корректных действий оператора или группы операторов зависит эффективность работы технической системы в целом. В ряде случаев деятельность человека-оператора определяет целостность самого объекта управления (ОУ), безопасность людей и окружающей среды. Как показывает статистика аварийных ситуаций, основные причины аварий – неверные действия операторов вследствие недостаточной профессиональной подготовки и некорректного взаимодействия операторов друг с другом. При работе оператора необходимо учитывать следующие показатели: качество, быстродействие и надежность функционирования человеко-машинной системы в целом. Кроме того, человек-оператор является во многих практических случаях наиболее эффективной компонентой системы управления для решения задачи противоаварийного и восстанавливающего управления.

Существующие задачи в области человеко-машинных систем управления остро ставят проблему совершенствования методических и технических средств профессионального отбора и подготовки операторов. Как известно, одним из наиболее эффективных средств формирования профессиональных компетенций, необходимых оператору в реальных условиях деятельности, являются тренажеры [4–10].

Работа человека-оператора представляет собой совокупность взаимосвязанных процессов не только с аппаратно-программными средствами АСУ ТП, но и взаимодействия с другими участниками технологического процесса. Проектирование и эксплуатация многофункционального компьютерного тренажера не могут выполняться в отдельности, без учета особенностей взаимодействия коллектива операторов. Наличие параллельных и разнородных процессов человеко-машинной системы требует разработки и развития оригинальных принципов и методов моделирования. При решении данной задачи одним из центральных вопросов является формирование показателей качества компьютерного тренажера и работы человека-оператора.

Существующие подходы к оценке эффективности проектирования компьютерного тренажера представлены, например, в [10].

Предлагаемый авторами подход позволяет шире использовать показатели в задачах оптимизации производственных процессов, оценки эффективности работы человека-оператора, а также интегрировать предлагаемую систему показателей с логико-динамической моделью АСУ ТП.

В работе предлагается ввести численные показатели качества, связанные с затратами ресурсов. Первый из них – относительный показатель использования ресурсов R_i на выполнение i -й операции (задания):

$$R_i = \frac{t_i}{T_{Hi}}, \quad (1)$$

где t_i – фактическое время выполнения i -й операции (задания); T_{Hi} – нормативное время выполнения i -й операции, $i = 1...n$.

Если $R_i = 1$, то затрата ресурса (например, времени выполнения текущей операции) равняется нормативу. В формуле (1) при $R_i < 1$ текущие затраты меньше нормативного времени.

Среднее значение расхода ресурса вычисляется по формуле:

$$R_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i}{n} . \tag{2}$$

По значению относительного показателя качества можно судить об экономии или перерасходе данного вида ресурсов.

Если необходимо учесть значимость i -го ресурса, то необходимо рассчитать среднее взвешенное значение расхода ресурса

$$R_{cрв} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i R_i}{n} , \tag{3}$$

где w_i – весовые коэффициенты i -го параметра.

Для визуального представления показателей качества работы КТ целесообразно представить эти показатели в виде лепестковой диаграммы (рис. 1).

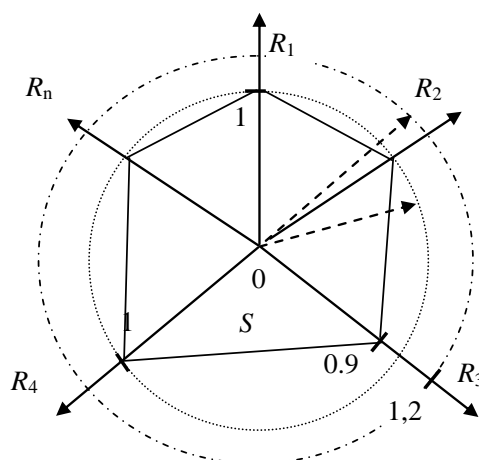


Рис. 1. Лепестковая диаграмма относительных показателей качества

По координатным осям этой диаграммы откладываются относительные показатели качества R_i . По представленной диаграмме можно судить об эффективности работы компьютерного тренажера: чем меньше площадь фигуры S , тем выше эффективность работы тренажера. Кроме того, с помощью данной диаграммы можно отследить степень разброса отдельных показателей.

Представленные выше показатели качества характеризуются полнотой оценки используемого ресурса, простотой вычисления и наглядностью. На рис. 2 представлена диаграмма участия группы N операторов от временных затрат на этапах Э1...Э4.

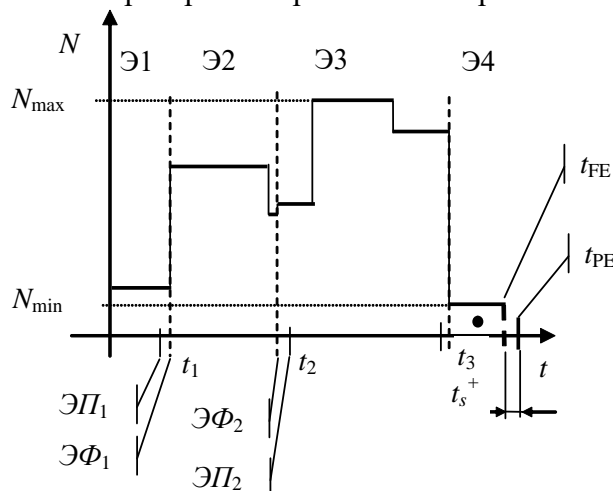


Рис. 2. Динамика участия группы операторов в работе над k задачами

На рис. 2 введены следующие обозначения:

t_{FE} , t_{PE} – фактическое и плановое окончание проекта;

t_s^+ , t_s^- – суммарное фактическое время выполнения поставленной задачи, индекс «+» или «-» указывает на досрочное или несвоевременное выполнение задачи;

ЭП – окончание этапа работы согласно плану;

ЭФ – фактическое окончание этапа работы.

Совокупность требований, предъявляемых к компьютерному тренажеру, формирует иерархию режимов его функционирования. Режимы работы многофункционального тренажера (МКТ) представлены на рис. 3 в виде дерева иерархии [8–10].

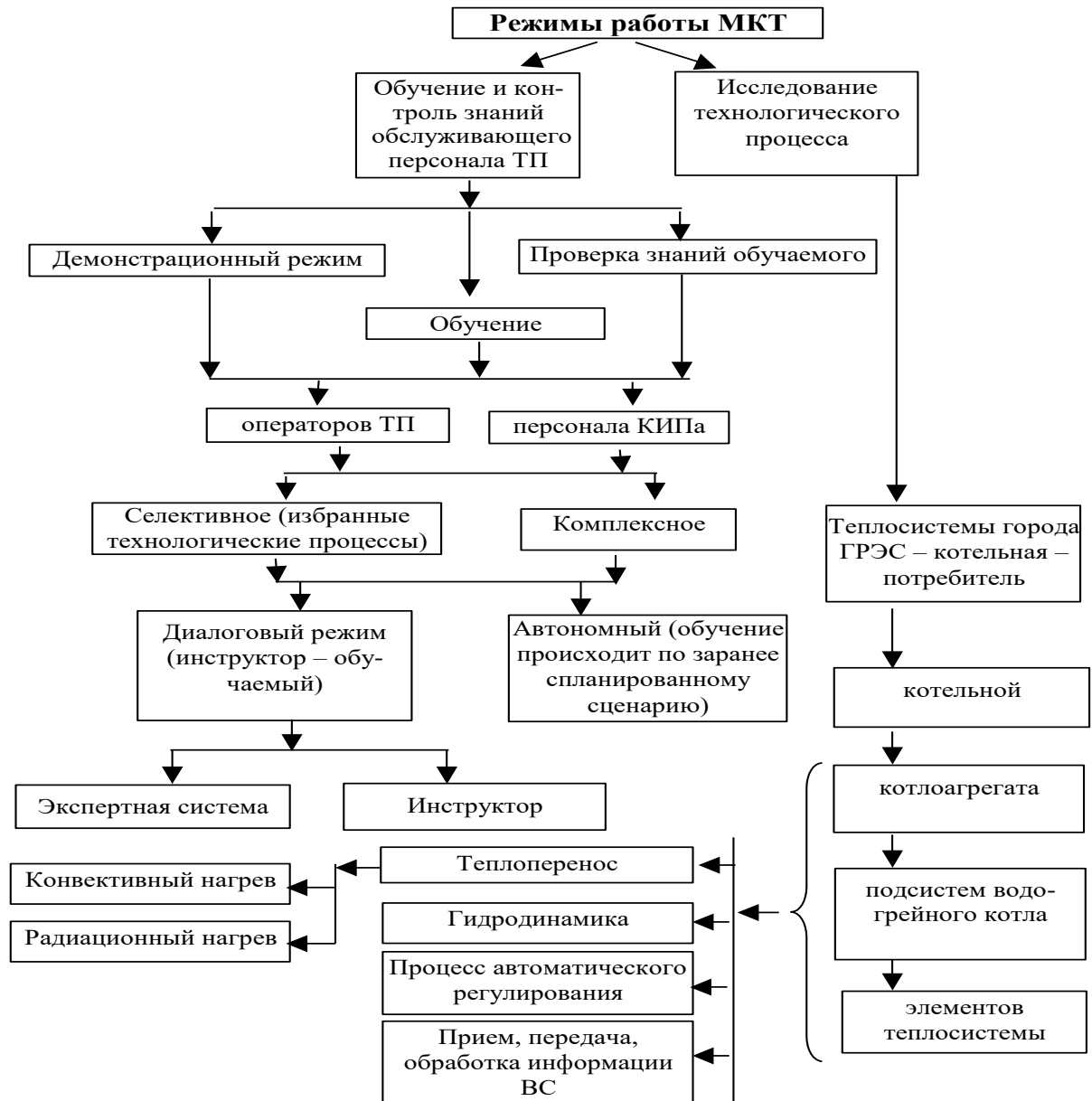


Рис. 3. Иерархическое дерево режимов работы МКТ теплоэнергетической системы

МКТ может работать в режиме обучения и контроля знаний операторов теплоэнергетической системы. Обучение базируется на использовании следующих основополагающих составляющих: имитация технологического процесса; визуализация и

сопровождение хода технологического процесса комментариями. Кроме того, режим моделирования компьютерного тренажера позволяет исследовать режимы работы АСУ ТП, т. е. ставить виртуальный физико-технологический эксперимент, что необходимо для детального анализа процессов, протекающих в исследуемой системе. Это позволяет эффективно проводить дальнейшую модернизацию АСУ ТП.

Работа тренажера должна быть основана на использовании виртуальной модели среды деятельности обслуживающего персонала и специалистов в области теплоэнергетики, управления и т. д. В основе тренажера лежит совокупность моделей объектов с детальным отражением конструкции и принципа действия технологического оборудования. На основе этих взаимодействующих моделей во времени может быть воссоздана работа как отдельных подсистем, так и всего технологического процесса предприятия.

Очевидно, что использовать постоянно развернутую модель технологического объекта в МКТ с максимальным числом компонентов и максимальным уровнем детализации нет необходимости, а часто и невозможно из-за наличия существующих ограничений средств вычислительной техники. Поэтому необходимо использовать адаптивную архитектуру модели, которая требуется в конкретном сеансе работы. Для обеспечения адекватного функционирования модели МКТ согласно заданному режиму работы предлагается использовать механизм адаптации динамической модели тренажера. Для этого в структуру тренажера введено средство структурно-параметрического профилирования [11] динамической модели (рис. 4).

Система профилирования динамической модели осуществляет:

- 1) оценку характеристик аппаратного обеспечения МКТ;
- 2) выбор существующей динамической модели согласно заданному режиму работы;
- 3) тестирование динамической модели с целью оценки ее соответствия заданным требованиям.

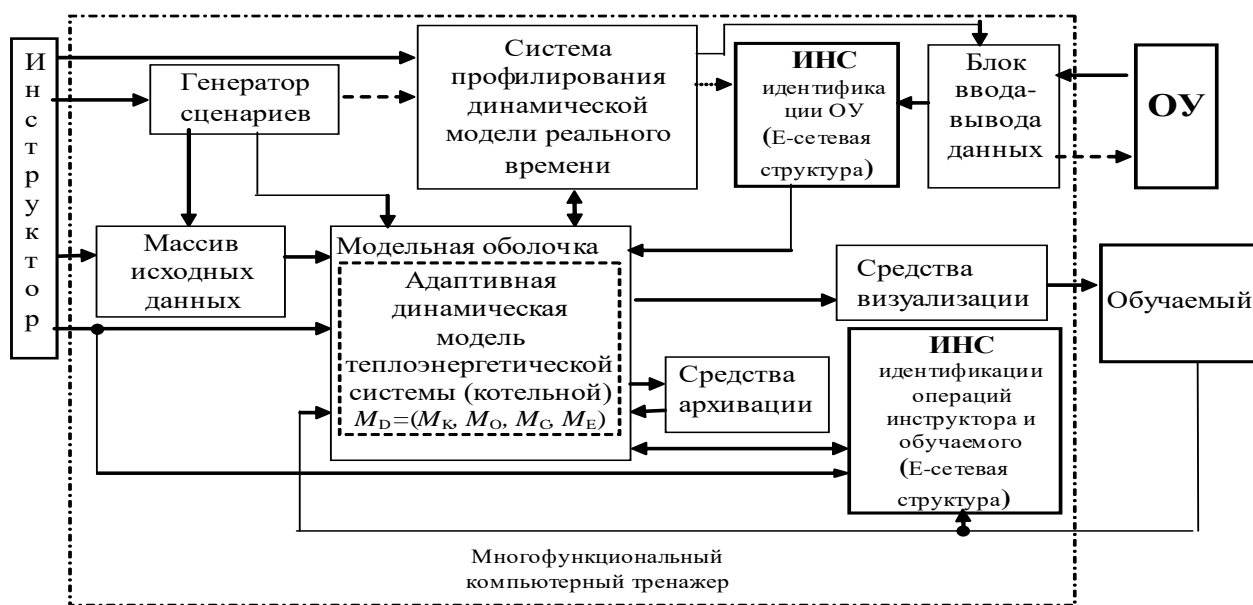


Рис. 4. Структурная схема многофункционального компьютерного тренажера

Работа тренажера основана на использовании виртуальной модели среды деятельности обслуживающего персонала и специалистов в области теплоэнергетики, управления и т. д. Основой МКТ является совокупность моделей объектов, с детальным отражением конструкции и принципа действия технологического оборудования [1–3, 12]. На основе эмуляции взаимодействующих процессов во времени может быть воссоздана работа как отдельных подсистем, так и всего технологического процесса предприятия. Предлагаемая подсистема тренажера активизирует те компоненты модели с требуемыми

параметрами, которые необходимы и достаточны для адекватного воспроизведения процесса, и тем самым формируется требуемая архитектура модели.

Архитектура модели определяется на основании выбора пользователем режима работы МКТ. Согласно выбранному режиму средство профилирования формирует необходимый набор компонент с требуемым уровнем детализации и вычислительными параметрами системы. С другой стороны, архитектура модели определяется ресурсными возможностями средств вычислительной техники, т. е. временными затратами на воспроизведение процессов в моделируемой системе. Реконфигурация модели позволяет отключать или включать те или иные компоненты с требуемым профилем в общую архитектуру модели и тем самым обеспечивать баланс временных параметров системы реального времени. Кроме того, для получения (уточнения) моделей технологического объекта управления, динамических свойств человека-оператора введена искусственная нейронная сеть (ИНС). Кроме того, ИНС позволяет осуществлять идентификацию операций (поведения) как инструктора, так и обучаемого.

Таким образом, при выборе формализованного аппарата моделирования человеко-машинных систем необходимо учесть возможность реализации структурно-параметрической реконфигурации модели и возможности имитации работы искусственных нейронных сетей.

Центральной подсистемой в компьютерном тренажере, например, теплоэнергетической системы, является адаптивная динамическая модель M_D , состоящая из трех взаимодействующих между собой моделей: $M_D = (M_K, M_C, M_E)$, где M_K – модель технологического объекта управления, M_C – модель АСУ ТП и M_E – модель окружающей среды. Вышеуказанные модели строятся по иерархической архитектуре: т. е. подмодели состоят из совокупности моделей более низкого уровня, например, $M_K = \{M_T, M_G, M_{VOZ}\}$, где M_T – модель тепловых процессов в топочной и конвективной камере; M_G – модель гидродинамических процессов в водяном тракте котла; M_{VOZ} – модель газовых процессов в топочной камере.

Генератор сценариев (ГС) (рис. 4) в структуре МКТ необходим для организации процесса обучения операторов в автоматическом режиме. Инструктор указывает тематику задания, после чего ГС синтезирует ситуацию, которую необходимо разобрать и отработать обучаемому. ГС на основании выбранной задачи осуществляет подстройку M_D через систему профилирования, что позволяет адаптировать модели согласно выбранному сценарию.

Остальные элементы МКТ: массив исходных данных, средства визуализации и архивации – являются типовыми и необходимыми для работы любого компьютерного тренажера [10].

Для построения математической модели M_D необходимо учитывать протекание разнородных дискретно-непрерывных многомерных процессов. Например, для построения адекватной динамической модели нагрева теплоносителя согласно режиму работы МКТ необходимо обеспечить моделирование системы с распределенными параметрами согласно формуле в операторной форме. Например, для определения температуры теплоносителя в динамическом режиме системы с распределенными параметрами необходимо найти оригинал функции

$$T_{\text{теп}}(\xi, s) = E_1(s)e^{n_1(s)\frac{\xi}{\alpha}} + E_2(s)e^{n_2(s)\frac{\xi}{\alpha}} + \frac{\beta_3\Delta\omega_0}{s} \left[\frac{a_1}{\beta_2} + (\beta_4 + \xi\beta_5)e^{-a_3\xi} \right], \quad (4)$$

где $T_{\text{теп}}(\xi, s)$ – изображения Лапласа температуры теплоносителя, зависящая от цилиндрической координаты ξ ; $\alpha, a_1, a_3, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, E_1(s); E_2(s)$ – коэффициенты уравнения, учитывающие структурно-параметрические характеристики теплоэнергетического объекта, которые приведены в [10].

При моделировании температуры теплоносителя в качестве системы с сосредоточенными параметрами можно использовать аппарат передаточных функций

$$W(s) = \frac{e^{-\tau s} k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (5)$$

где τ – время запаздывания; T_1, T_2 – постоянные времени модели; k – статический коэффициент передачи технологического объекта регулирования.

Таким образом, для реализации современного многофункционального компьютерного тренажера становится актуальной проблема выбора формализма моделирования с единых методологических позиций, обладающего следующими свойствами:

- 1) адекватно описывать и программно реализовывать сложные системы, функционирующие в заданном масштабе времени;
- 2) предоставлять пользователю возможность адаптации модели с использованием принципов технологии «блочного» программирования, что позволит даже малоподготовленному пользователю изменять структуру и параметры модели;
- 3) поддерживать технологию объектно-ориентированного моделирования;
- 4) поддерживать эмуляцию искусственных нейронных сетей.

Для удобства построения модели в МКТ необходимо обеспечить как технологию «блочного» моделирования – Block Function Diagram, так и моделирование с позиций диаграмм состояний Харела [2, 10].

Литература

1. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. E-Network Modelling of Process Industrial Control Systems in Building Computer Simulators // Control and Communications (SIBCON) : Proceedings of the XII International Siberian Conference. Moscow, May 12–14, 2016. М., 2016. P. 185–191.
2. Бенькович Е. С., Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Практическое моделирование динамических систем. СПб. : БХВ-Петербург, 2002. 464 с.
3. Виттих В. А., Волхонцев Д. В., Горбунова Т. Ф., Лахин О. И., Ройтам Е. М., Скобелев О. П., Скобелев П. О. Мультимедиа-онтологии и виртуальные объекты: проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. III Междунар. конф. / под ред. акад. В. П. Мясникова, акад. Н. А. Кузнецова, проф. В. А. Виттиха. Самара : Самар. науч. центр РАН, 2001. С. 459–468 с.
4. Григорьев Л. И., Свистунов А. А. Единый подход к разработке компьютерных тренажеров для диспетчерского управления нефте- и газотранспортными системами // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефть. пром-сти. 2003. № 3. С. 14–18.
5. Дозорцев В. М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов: теория, методология построения и использования : дис. ... д-ра техн. наук. М., 1999. 442 с.
6. Дозорцев В. М., Левит М. Ю. Объектно-ориентированное моделирование технологических процессов в задачах обучения и инжиниринга // Математические методы в технике и технологиях : тр. XII Междунар. науч. конф. Вел. Новгород, 1999. Т. 4.
7. Рабенко В. С. Компьютерные тренажеры как средство повышения качества профессиональной подготовленности операторов // Вестн. ИГЭУ. 2004. Вып. 2. С. 19–27.
8. Магид С. И. Теория и практика тренажеростроения для тепловых электрических станций. М. : Изд-во МЭИ, 1998. 154 с.
9. Магид С. И., Аракелян, Э. К., Зверьков В. П. и др. Сетевой компьютерный тренажер для комплексной подготовки оперативного персонала тепловых электрических станций // Вестн. МЭИ. 1998. № 3. С. 15–20.
10. Цапко Г. П., Цапко С. Г., Тараканов Д. В. Е-сетевой метод информационно-логического проектирования компьютерных тренажеров : моногр. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2005. 228 с.

11. Цапко Г. П., Цапко С. Г., Тараканов Д. В. Базовые принципы построения E-сетевой модели сложной технической системы // Изв. Томск. политех. ун-та. 2006. Т. 309. № 4. С. 152–157.

12. Braginsky M. Ya., Tarakanov D. V., Tsapko S. G. Hierarchical analytical and simulation modelling of human-machine systems with interference // Journal of Physics : Conference Series. 2017. Vol. 803. Information Technologies in Business and Industry (ITBI2016) : International Conference, 21–26 September 2016. Tomsk, Russian Federation. Tomsk, 2016. P. 120–126.