

УДК 621.311.25:621.039

ЛОКАЛЬНЫЙ ТРЕНАЖЕР ПО УПРАВЛЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТЬЮ АЭС

Плетяный И.В.

Рассмотрены принципы построения тренажера по управлению электрической частью АЭС. Предложены организационно-методические рекомендации по проведению занятий на тренажере.

Необходимость повышения эффективности подготовки оперативного персонала (ОП) электрического цеха (ЭЦ) АЭС вызвана следующими факторами: требованиями безопасной эксплуатации АЭС; повышением удельного веса АЭС в суммарном производстве электроэнергии и как следствие увеличением ответственности ОП ЭЦ в поддержании устойчивого рабочего состояния энергосистемы Украины.

Тренажеры являются наиболее эффективным средством профессиональной подготовки ОП сложных объектов управления (ОУ). К таким объектам относится электрическая часть (ЭЧ) АЭС.

Требованиям профессиональной подготовки ОП ЭЦ АЭС будет удовлетворять комплексный тренажер [1], структура которого изображена на рисунке 1. Тренажер состоит из двух, функционально независимых частей, условно называемых Электроцех 1 – локальный тренажер по управлению электрической схемой собственных нужд энергоблока АЭС, и Электроцех 2 – локальный тренажер по управлению

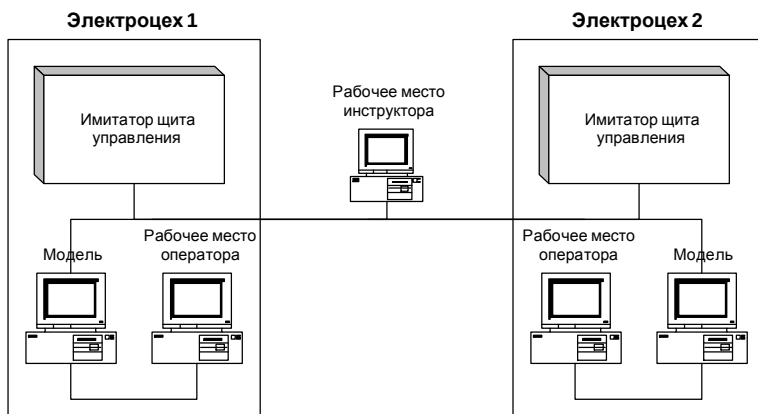


Рисунок 1 – Структура тренажера по управлению электрической частью АЭС

В состав каждого тренажера входят имитатор щита управления (ЩУ) и две ПЭВМ. Имитатор ЩУ отображает электрическую схему ОУ, имеет устройства управления и устройства отображения информации (приборы, табло и др.). Имитатор ЩУ является аналогом реального ЩУ. Одна ПЭВМ является ведущей, на которой реализуется имитационная модель ОУ. Она также является рабочим местом инструктора при автономном использовании тренажера. Эта ПЭВМ управляет имитатором ЩУ и второй ПЭВМ. Вторая ПЭВМ – рабочее место обучаемого, где имитируются местные посты управления.

Тренажеры Электроцех 1 и Электроцех 2 могут работать совместно в

локальной сети, обмениваясь параметрами через сервер обмена

данными. В данной конфигурации тренажера функции сервера

выполняет ПЭВМ, на которой находится рабочее место инструктора

Инструктор может управлять процессом тренировки, просматривать

ключевые параметры моделей, вносить возмущения в работу моделей и

т.д. При таком режиме использования локальных тренажеров

осуществляется профессиональная подготовка каменщиков ЭЦ.

Создание такого тренажерного комплекса обосновывается сложностью и разветвленностью электрической части АЭС и тем, что 60% переключений в этой системе осуществляется непосредственно или с местных постов управления.

Учебная информационная модель (УИМ) комплексного тренажера аппаратно разделена на две части: УИМ, реализованная в виде специально разработанных и изготовленных пультов УИМ, реализованная на дисплеях ПЭВМ.

Пульты тренажера являются имитаторами реальных ЩУ, поэтому они наилучшим образом обеспечивают эргономические качества тренажера.

УИМ, реализованная на дисплеях ПЭВМ, по содержанию и

компоновке, где это возможно и целесообразно, полностью повторяет

мнемосхему ОУ. Она легко “узнаваема” обучаемым. В основном это

местные посты управления электрооборудованием АЭС, имитирующие реальные посты. Часть электрооборудования не имеющая ЩУ, или имеющая разбросанные на больших территориях, имитируется на логическом уровне. Такой подход полностью оправдывает себя, так как позволяет формировать у обучаемых целостное представление об ОУ.

Деятельность обучаемых происходит на фоне общего управления ЭЧ АЭС, позволяя каждому участнику тренировки видеть свой вклад в эту деятельность и чувствовать свою ответственность за неправильные или неэффективные действия.

УИМ, реализованная на дисплеях, представляет собой набор графических панелей, состоящих из статической и динамической частей. Переход от одной панели к другой осуществляется с помощью доступного “меню”. Иерархия “меню” организована в виде дерева возможных переходов

Основу комплексного тренажера составляет имитационная логико-динамическая модель функционирования ЭЧ АЭС. Она представляет собой комплекс алгоритмов и программ реального времени.

Построение динамической модели ЭЧ является одним из наиболее серьезных моментов при разработке режимных тренажеров для подготовки ОП. Такая модель должна позволять имитировать в темпе процесса (реального времени) с заданной точностью поведение основных параметров режима ЭЧ. К таким параметрам относятся напряжение, ток и частота в узлах сети, потоки активной и реактивной мощности в линиях электропередачи (ЛЭП).

Модель ЭЧ должна учитывать динамику электромеханических и длительных переходных процессов, а также действие основных систем регулирования, релейной защиты и противоаварийной автоматики. При выполнении этих условий поведение модели ЭЧ будет практически неотличимо (с точки зрения обучаемого оператора) от поведения реальной ЭЧ.

Модель ЭЧ состоит из отдельных компонент. Каждый компонент модели является логически завершенным объектом моделирования, представляющим собой процедуру в виде алгоритма. Компоненты взаимодействуют друг с другом с помощью входных и выходных переменных. Модель ЭЧ состоит из следующих компонент модели

коммутационного состояния сети, модели установившегося режима сети, моделей объектов управления, моделей переходных процессов.

В модели ОУ входят модели турбогенераторов дизель-генераторов

трансформаторов, потребителей, эквивалентных источников

электрической энергии энергосистемы, систем релейной защиты и

автоматики. В модели переходных процессов входят модели изменения

нагрузки, частоты и напряжения на секциях.

Модель коммутационного состояния электрической части АЭС предназначена для формирования и воспроизведения конфигурации (топологии) электрической сети в любой момент времени.

При имитационном моделировании ЭЧ в условиях многоэлементности и разветвленности возникает проблема адекватного отображения состояний ОУ на УИМ в реальном масштабе времени. Один из подходов к решению этой проблемы состоит в представлении моделируемой ЭЧ в виде конечного неориентированного графа с последующим формированием на базе данного представления экспертных правил функционирования ОУ.

Вершины графа представляют собой абстрагированные участки

электрической сети, в которых могут рассчитываться необходимые

параметры (электрический ток, напряжение, частота, мощность). Ребра

графа представляют собой те элементы ЭЧ, которые могут находиться в

двух логических состояниях: “включено” и “выключено”. Такими

элементами являются коммутационные аппараты (включен, выключен),

трансформаторы, генераторы (работает, не работает) и т.д.

Основу экспертных правил и функциональных зависимостей составляет информация о связях между определенными вершинами графа коммутационного состояния ЭЧ.

Модель коммутационного состояния представляет собой конечный неориентированный граф коммутационного состояния ЭЧ и алгоритм определения связности между вершинами этого графа. Граф

коммутационного состояния представлен с помощью списка ребер. При этом каждому ребру сопоставляется тройка (R, X, Y) , где R – ребро, X – первая вершина, Y – вторая вершина. В основе алгоритма определения связей между вершинами графа используется методика имитационного моделирования ОУ с разветвленной и переменной структурой[2].

Алгоритмы определения связей между вершинами графа используются при имитационном моделировании режимов ЭЧ, правил функционирования релейной защиты и автоматики, режимов и состояний ОУ ЭЧ.

Модель установившегося режима ЭЧ предназначена для имитации функционирования ЭЧ АЭС в установившихся состояниях. Она должна обеспечивать расчет и отображение частоты, напряжения, тока, распределения активной и реактивной мощностей между источниками электроэнергии (генераторами электростанции, эквивалентными источниками электрической энергии энергосистемы) и потребителями с учетом статизма скоростных и внешних характеристик генераторов и величины нагрузки. Для расчета распределения потоков мощности используется модель, учитывающая влияние частоты и напряжения на изменение сальдо активной и реактивной мощностей в узлах сети соответственно.

Энергосистема, связанная с ЭЧ АЭС, моделируется эквивалентными источниками электрической энергии, соответствующими ЛЭП и подключенными к ним эквивалентными нагрузками. В модели установившегося состояния приняты следующие допущения: эквивалентные источники электрической энергии, соответствующие ЛЭП являются частью единой энергосистемы, т. е. связаны между собой по частоте и напряжению помимо открытого распределительного устройства (ОРУ) АЭС; распределение и перераспределение активных и реактивных мощностей между моделируемыми параллельно работающими эквивалентными источниками электрической энергии энергосистемы происходит только по ОРУ АЭС.

Введенные допущения значительно упрощают разработку имитационной модели ЭЧ АЭС и никак не ухудшают показатели качества обучения. Так, в качестве исходных режимов использовались реальные режимы работы главной электрической схемы АЭС.

Если рассмотреть статические скоростные характеристики источников электрической энергии при их параллельной работе (рисунок 2), то справедлива система линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} f_c &= F_{1y} - k_1 \times P_1 \\ f_c &= F_{2y} - k_2 \times P_2 \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ f_c &= F_{ny} - k_n \times P_n \\ P_\Sigma &= P_1 + P_2 + \dots + P_n \end{aligned} \right\},$$

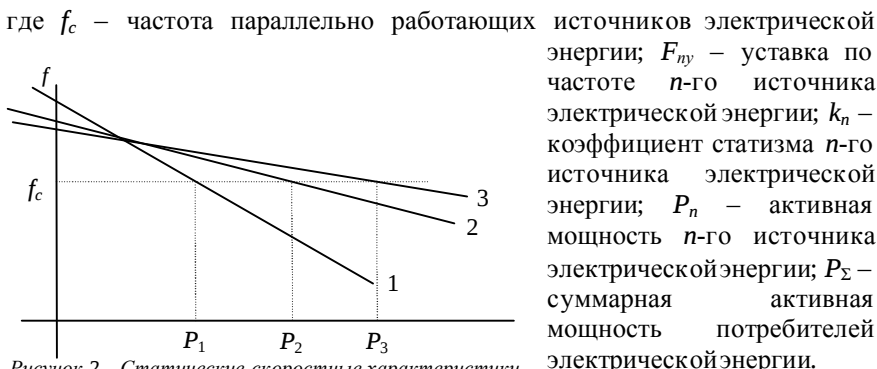


Рисунок 2 – Статические скоростные характеристики источников электрической энергии при их параллельной работе:

1 – скоростная характеристика первого источника электрической энергии; 2 – второго; 3 – третьего

получаем следующие формулы

уравнений методом Гаусса,

$$f_c = \frac{(i_1 \frac{1}{k_1} F_{1y} + i_2 \frac{1}{k_2} F_{2y} + \dots + i_n \frac{1}{k_n} F_{ny} - P_\Sigma)}{i_1 \frac{1}{k_1} + i_2 \frac{1}{k_2} + \dots + i_n \frac{1}{k_n}}; \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{f_c - F_{1y}}{k_1} \\ P_2 &= \frac{f_c - F_{2y}}{k_2} \\ &\dots\dots\dots \\ P_n &= \frac{f_c - F_{ny}}{k_n} \end{aligned} \right\}.$$

Аналогично, если рассмотреть внешние характеристики источников электрической энергии при их параллельной работе (рисунок 3), то

справедлива система линейных уравнений

$$\left. \begin{aligned} u_c &= E_1 - n_1 \times Q_1 \\ u_c &= E_2 - n_2 \times Q_2 \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ u_c &= E_m - n_m \times Q_m \\ Q_\Sigma &= Q_1 + Q_2 + \dots + Q_m \end{aligned} \right\},$$

где u_c – напряжение параллельно работающих источников электрической энергии; E_m – ЭДС m -го источника электрической энергии; n_m – коэффициент статизма внешней характеристики m -го источника электрической энергии; Q_m – реактивная мощность m -го источника электрической энергии; Q_Σ – суммарная реактивная мощность потребителей электрической энергии.

Решая эту систему уравнения методом Гаусса, получаем следующие формулы

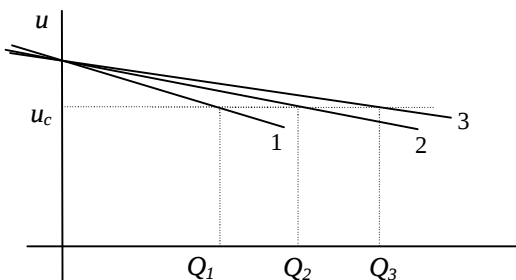


Рисунок 3 – Внешние характеристики источников электрической энергии при их параллельной работе:

1 – внешняя характеристика первого источника электрической энергии; 2 – внешнего второго; 3 – внешнего третьего

$$u_c = \frac{(i_1 \frac{1}{n_1} E_{1y} + i_2 \frac{1}{n_2} E_{2y} + \dots + i_m \frac{1}{n_m} E_{my} - Q_\Sigma)}{i_1 \frac{1}{n_1} + i_2 \frac{1}{n_2} + \dots + i_m \frac{1}{n_m}}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{u_c - E_{1y}}{n_1} \\ Q_2 &= \frac{u_c - E_{2y}}{n_2} \\ &\dots\dots\dots \\ Q_m &= \frac{u_c - E_{my}}{n_m} \end{aligned} \right\}.$$

В формулах (1) и (2) коэффициенты i_n (i_m) учитывают наличие связи рассматриваемой вершины (частота или напряжение, в которой рассчитываются) и n -го (m -го) источника электрической энергии. Они

могут быть 0 или 1. Значения коэффициентов определяются с помощью модели коммутационного состояния.

Для имитации плановых изменений в энергосистеме для каждой ЛЭП на последовательные моменты времени (например, каждый час рассматриваемых суток) задаются плановые значения генерации и нагрузки.

Модели переходных процессов ЭЧ предназначены для имитации функционирования ЭЧ АЭС в нормальных и аварийных режимах. Они должны обеспечивать имитацию и отображение изменений во времени частоты, напряжения, тока, активной и реактивной мощностей.

Переходные процессы в ЭЧ моделируются псевдодинамическим способом, т.е. изменение режимных параметров во времени при этом происходит по заранее заданному закону. Этот подход вполне оправдывает себя, так как позволяет отображать качественный характер переходного процесса, сохранять быстродействие всей программы модели ЭЧ и при этом не ухудшать качества обучения. Такой подход также значительно сокращает время и трудовые затраты при разработке имитационной модели.

Модели ОУ ЭЧ АЭС представлены отдельными компонентами, имеющими входы и выходы. Алгоритмы преобразования входных переменных в выходные реализуют математические зависимости, построенные на основе экспертных правил функционирования реальных объектов ЭЧ АЭС. Экспертные правила функционирования ОУ ЭЧ использовались в тех случаях, где математическая интерпретация поведения ОУ имеет сложный характер, и для реализации которой потребовалось бы затратить значительные ресурсы ЭВМ.

Разработанная многорежимная имитационная модель электрической части АЭС позволяет воспроизводить большинство возможных нормальных и аварийных состояний и режимов электрической части, которые необходимы при подготовке оперативного персонала. Модель ЭЧ АЭС является открытой. Она может постоянно дополняться новыми ситуациями и режимами без изменения общей структуры. При этом корректируются определенные участки модели (блок начальных условий и сценариев).

Модель не ограничивает динамику процесса управления электрической частью сценарием, предоставляя обучаемому свободу выбора любых управляющих воздействий, базирующихся на его знаниях, умениях, интуиции, позволяя ему накапливать опыт управления электрооборудованием АЭС. Она приближает процесс обучения к реальному процессу управления и тем самым повышает достоверность контроля при исследовании операторской деятельности.

Имитационная модель электрической части АЭС внедрена при разработке комплексного тренажера для подготовки оперативного

персонала электрического цеха Хмельницкой АЭС и локального тренажера по управлению электрической схемой собственных нужд энергоблока АЭС для обучения студентов Севастопольского института ядерной энергии и промышленности. Тренажеры успешно прошли опытную эксплуатацию. Имитационная модель получила высокую экспертную оценку на адекватность и достоверность реальному объекту управления.

Библиографический список

1. Черемухин Ю.Д. Комплексный тренажер для подготовки оперативного персонала электроцеха АЭС / Ю.Д. Черемухин // Энергетика и электрификация. — 1996. — № 6. — С. 25–31.
2. Плетяный И.В. Инструментальные средства автоматизации конструирования имитационных моделей электрических сетей для тренажеров / И.В. Плетяный // Зб. наук. пр. / Ін-т проблем моделювання в енергетиці НАН України. — Львів, 1998. — Вип. 2. — С. 156–163.

Поступила в редакцию 22.11.2001 г