

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривов М.В., Благодарный Н.С. Динамический структурный синтез тренажерных моделей / Кривов М.В., Благодарный Н.С., Кобозев В.Ю., Колмогоров А.Г. //

Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 131-138.

УДК 519.68

Кривов Максим Викторович,

к.т.н., доцент, зав. кафедрой вычислительных машин и комплексов, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: vmk@angtu.ru

Колмогоров Алексей Геннадьевич,

к.т.н., доцент, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: atr@angtu.ru

Благодарный Николай Семенович,

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Автоматизированный электропривод и электротехника», Высшая школа технологии и энергетики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Сухоносова Вера Сергеевна,

студент кафедры «Вычислительные машины и комплексы», ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

ПРОБЛЕМАТИКА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ТЭЦ-1 КОТЛАСКОГО ЦБК И ПУТИ РЕШЕНИЯ

Krivov M.V., Kolmogorov A.G., Blagodarny N.S., Suhonosova V.S.

PROBLEM OF COMPUTER MODELING OF STEAM GENERATORS CHP-1 OF THE KORYAZHMA BRANCH OF ILM GROUP AND WAYS OF SOLUTION

Аннотация. Рассмотрена концепция синтеза компьютерной тренажерной модели группы парогенераторов БКЗ-160-100Ф. Сформулирован подход для построения структуры математического описания с возможностью распараллеливания вычислительных процедур.

Ключевые слова: компьютерная модель, теплоэнергетические объекты, тренажерная модель, платформа моделирования.

Abstract. The concept of synthesis of a computer simulator model of a group of steam generators BKZ-160-100F is considered. An approach is formulated for constructing a mathematical description structure with the possibility of parallelization of computational procedures.

Keywords: computer model, thermal power facilities, simulator model, simulation platform

Одним из научных проектов кафедры автоматизации технологических процессов и кафедры вычислительных машин АНГТУ является разработка полномасштабной компьютерной модели парогенераторов ТЭЦ-1 в г. Коряжма Архангельской области. Данную работу АНГТУ выполняет в сетевом взаимодействии с Санкт-Петербургским государственным университетом промышленных технологий и дизайна (г. Санкт-Петербург).

Результатом научно-исследовательской работы ученых должны стать программное, информационное и математическое обеспе-

чение, реализующее полномасштабную компьютерную модель производства пара на ТЭЦ-1. Важными свойствами такой модели являются адекватное воспроизведение поведения технологического процесса, отработка средств автоматики и систем противоаварийной защиты (ПАЗ). Практическая ценность полученных результатов состоит в применении компьютерной модели производства в тренажерном комплексе для обучения машинистов котлов безопасной эксплуатации котлов ТЭЦ - объектов повышенной опасности.

ТЭЦ-1 является достаточно крупным предприятием для г. Коряжма, однако, по электрической мощности данное предприятие можно отнести к электрическим станциям средней мощности. Её установленная электрическая мощность составляет 315 МВт. Для сравнения установленная мощность ТЭЦ-9 АО «Иркутскэнерго» - 540 МВт, а ТЭЦ-10 той же компании - 1110 МВт.

Продукты технологического процесса, вырабатываемые парогенераторами (ПГ) ТЭЦ - пар высокого давления ($>100 \text{ кг/см}^2$), используются для бумажного производства Филиала АО «Группа «Илим» в г. Коряжме и тепло-электроснабжения объектов г. Коряжма.

В процессе производства пара используется 10 ПГ типа БКЗ-160-100Ф с производительностью по пару до 160 т/час и 2 ПГ типа БКЗ-210-100Ф с производительностью до 210 т/час. Всего 12 паровых энергетических котлов, работающих на 7 паровых турбинах. В производстве используется оборудование, работающее при давлении 90 и 130 атм.

Структурно технологический процесс производства пара приведен на рисунке 1.

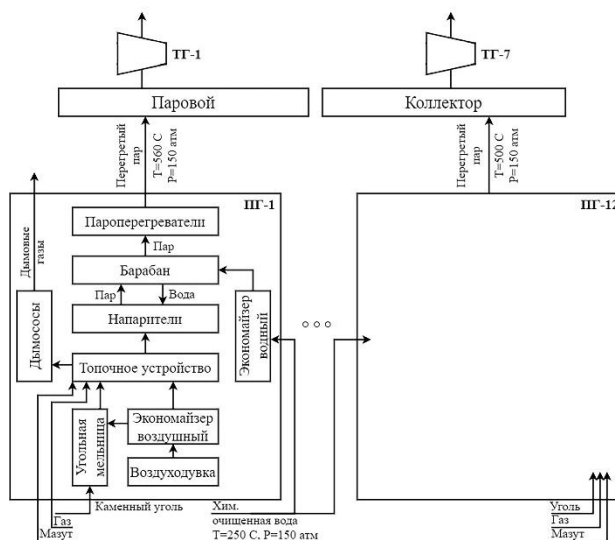


Рисунок 1. – Технологический процесс производства перегретого пара

Анализ теплоэнергетических установок позволил выделить следующие особенности объекта моделирования:

1) весь процесс производства пара разделен на 12 технологических потоков - для каждого ПГ отдельная группа потоков по питательной воде, воздуху и топливу;

2) ПГ подключены к общему паропроводу, и суммарная производительность по пару определяется совместной работой парогенераторов.

3) конструкция котлов позволяет вырабатывать пар с КПД 94%, что обусловлено сложной конструкцией топки, радиантной и конвективной зоной котла, сложными перекрестными потоками пара и питательной воды;

4) каждый ПГ оснащен горелками, способными работать на природном газе, мазуте и каменном угле. Причем производительность парогенератора сильно зависит от вида топлива: номинальная производительность до 140 т/час пара на каменном угле и до 160 т/час на природном газе;

5) в соответствии с требованиями эксплуатации водогрейных котлов, арматура на потоках дублируется;

6) стадии парообразования в ПГ разделены конструктивно отдельными элементами котла (нагреватели, пароперегреватели и т.п.);

7) физические процессы производства пара затрагивают процессы изменения фазового состояния потоков;

8) управление каждым ПГ осуществляется отдельной АСУТП с развитыми функциями управления;

9) для описания состояния одного парогенератора требуется не менее 199 аналоговых переменных;

10) управление потоками одного парогенератора осуществляется с помощью 250 задвижек и клапанов.

В свете требований к качеству компьютерной модели ТЭЦ ставятся задачи структурного синтеза модели, позволяющие обеспечить следующие свойства:

1) компьютерная модель должна адекватно отражать работу (динамику) технологического оборудования в широком диапазоне режимов работы станции и парогенераторов, включая режимы пуска и останова оборудования, а также аварийный и нештатные режимы;

2) компьютерная модель должна быть полномасштабной, то есть моделировать не только технологический процесс, но и системы управления и системы противоаварийной защиты;

3) компьютерная модель должна эмулировать те же самые элементы человеко-машинного взаимодействия, что и реальная АСУТП;

4) компьютерная модель должна иметь механизм внешнего взаимодействия (НМИ) с внешними системами.

Поскольку у авторов имеется опыт моделирования крупных производственных процессов [1], в том числе и теплоэнергетических установок, то можно предложить структуру математического описания ТЭЦ-1 в форме следующей схемы (рисунок 2).

Компьютерная модель базируется на пуле (очереди) математических моделей однотипных объектов, в данном случае - парогенераторов. В пуле реализован динамический массив моделей-объектов. Каждый элемент этого массива содержит сведения о своей структуре, то есть о тех моделях процессов и оборудования, которые в него включены, о внутренних и внешних связях объекта в форме информации о структуре потоков и разделяемую область данных, в которой каждый объект размещает параметры моделирования и результаты расчета модели.

Структура модели строится на основе объектного подхода, где моделируемые физические процессы обворачиваются в объектный код и у каждого объекта есть метод, рассчитывающий модель на каждом шаге итераций.

При инициализации задачи моделирования модуль управления загружает в область данных начальные условия. Взаимодействие компонентов модели, а также взаимодействие с пользователями модели осуществляется посредством доступа и изменения данных в разделяемой области данных.



Рисунок 2. – Структура компьютерной модели

Процесс моделирования организуется вычислительным модулем, который по системному таймеру рекурсивно обращается к методам расчета итерации от пула модели через итеративные методы моделей каждого парогенератора к моделям физических процессов, протекающих в них [2].

Анализируя моделируемый объект (ТЭЦ-1) можно выдвинуть следующие гипотезы:

- конструкция оборудования и организация процесса производства пара позволяет применять ячеистые модели процессов, протекающих в парогенераторах, а на уровне общего паропровода модель идеального смешения;
- учет фазовых переходов (испарение, конденсация) питательной воды и работа топочного устройства на разном типе топлива принципиально важная задача;
- структура модели должна учитывать перекрестные связи между компонентами математической модели;
- за счет большого количества параллельно работающих моделей и НМИ возрастает вычислительная нагрузка на аппаратную часть компьютерной модели.

Рассмотрим ряд особенностей построения данной компьютерной модели, представляющих определенные сложности её реализации.

Предположим, что компьютерная модель вычисляется итеративно в некотором масштабе времени. Тогда уравнения балансов модели, описывающие динамику физических процессов моделируемого объекта, а также уравнения, описывающие характер поведения компонентов моделируемой системы (арматуры, средств КИПиА и т.п.) формально можно представить зависимостью:

$$Y_{i+1}^j = Y_i^j + f(Y, t, h), \quad (1)$$

где Y – j -я моделируемая переменная ($j=1..n$); n – размерность вектора вычисляемых переменных; i – номер итерации; f – функция приращения; t – время модели; h – шаг интегрирования.

В программном обеспечении компьютерной модели выражение (1) реализуется в методах вычисления i -го шага (рисунок 2).

Чтобы обеспечить условия вычислений в заданном масштабе времени нужно выполнить следующий комплекс условий:

$$\begin{cases} i \cdot h = t \\ T(\bar{Y}_i) \leq h \cdot scale \end{cases} \quad (2)$$

где T - время вычисления i -ой итерации всех выражений (1) компьютерной модели, сек.; \bar{Y} - n -размерный вектор уравнений компьютерной модели; $scale$ - выбранный масштаб ускорения времени симулятора.

Условие (2) отражает принципиальную сложность реализации масштабирования времени моделирования t . Для симуляторов объектов большой емкости и инерционности возможность ускорения моделирования - важное потребительское качество. Сложность определена параметром $T(\bar{Y})$, представляющим время, необходимое вычислительной системе на вызов и вычисление всех n методов расчета i -го шага (рисунок 2). Этот параметр плохо детерминирован и зависит от кибернетической мощности вычислительной системы. При невысокой производительности

вычислительной системы и(или) при $scale > 1$ можно получить состояние модели, когда $T(\bar{Y}_i) > h \cdot scale$, что будет означать то, что вычислительная система будет не успевать просчитывать состояние компьютерной модели в заданное моделируемое время.

Чтобы решить данную, проблему авторами предлагается подход на основе применения методов асинхронного программирования. При данном подходе можно условие (2) привести к виду:

$$\begin{cases} i \cdot h = t \\ \sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j) \leq h \cdot scale \end{cases} \quad (3)$$

где $\tau_j(Y_j)$ - время вычисления j -ой итерационной функции (рисунок 2).

При этом за счет распараллеливания вычислений получим:

$$\sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j) \leq n \cdot \tau(\bar{Y}), \quad (4)$$

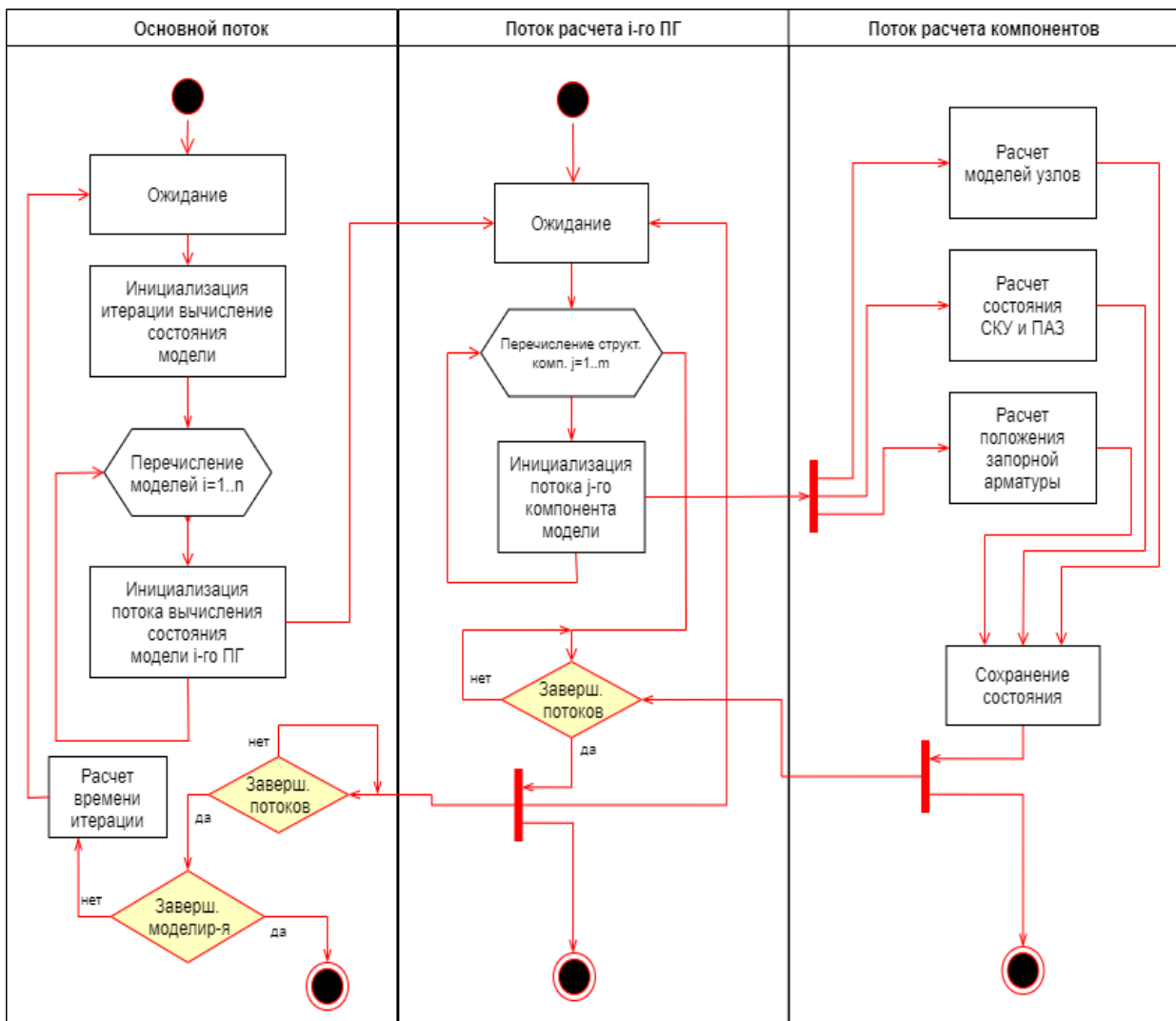


Рисунок 3. – Диаграмма вычислительных потоков расчета компьютерной модели

Для обеспечения реализации условия (4) требуется правильно организовать вычислительный процесс. В работе предлагается использовать подход на основе распараллеливания вычислительных задач в соответствии с диаграммой, приведенной на рисунке 3.

При запуске компьютерной модели алгоритм вычисления компьютерной модели заходит в бесконечный цикл расчета с временем ожидания $t_{ож}$.

Прерывание бесконечного цикла происходит внешними событиями, например, установленной пользователем паузой вычисления или командой завершения моделирования. Первоначальный расчет запускается мгновенно и вызывает методы расчета компьютерной модели на каждом шаге итерации.

$$t_{ож} = \begin{cases} h \cdot scale - \sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j), & (h \cdot scale - \sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j)) \geq 0 \\ 0, & h \cdot scale - \sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j) \leq 0 \end{cases}$$

Смысл этого выражения заключается в том, что если вычислительная система успевает рассчитать шаг итерации за отведенное время и остается еще запас времени $t_{ож}$, то все вычислительные потоки приостанавливаются на время $t_{ож}$ так, что выполняется соотношение (6).

$$\sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j) + t_{ож} = h \cdot scale \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \tau_j(Y_j) + t_{ож} \geq h \cdot scale \quad (6a)$$

Обеспечение соотношения (6) говорит о том, что вычислительная система обеспечивает близость временного масштаба моделирования, или практически обеспечивает (6a).

Рассмотрим практическую реализацию вычислительной схемы компьютерной модели [3]. На рисунке 4 приведена диаграмма классов компьютерной модели. При инициализации упражнения с соответствующими начальными условиями создается экземпляр класса «Сессия». В рамках этого экземпляра создается по заданным начальным условиям экземпляр класса «Симулятор», т.е. собственно компьютерная модель ТЭЦ-1.

Экземпляр симулятора имеет метод инициализации *Init()*, с помощью которого

Данные методы перечисляют структуру компьютерной модели, и для каждой модели ПГ создается отдельный вычислительный поток, который автономно симулирует поведение i -го ПГ.

В свою очередь каждый поток расчета модели ПГ порождает свою группу вычислительных потоков, которые в соответствии со структурой модели ПГ итерационно вычисляют

модели компонентов ПГ: модели узлов и агрегатов ПГ, состояния системы управления котлом и положения запорной арматуры. Рассчитанные значения моделей сохраняются в разделяемую область памяти переменных моделирования.

Время ожидания $t_{ож}$ определяется выражением (5):

происходит считывание структуры компьютерной модели из базы данных и построение системы математического описания в соответствии со структурой модели. В эту структуру входят математические модели всех ПГ в форме пула. В состав моделей ПГ входят модели узлов и агрегатов ПГ, модель системы управления и ПАЗ, модели запорной арматуры.

На рисунке показано, что компоненты компьютерной модели наследуют интерфейс *INodeBase*. Таким образом, за счет наследования интерфейса компоненты реализуют асинхронный метод *Iteration()*, который реализует расчет модели на каждом временном шаге h . Примерный вид этого метода приведен в листинге 1. Итерационный метод *Iteration()* объявлен с возвращаемым типом *Task<int>*, что позволяет превратить вызов этого метода в отдельный программный поток. Многопоточность расчета итерации будет управляться ресурсами операционной системы за счет распределения по доступным вычислительным ядрам центрального процессора.

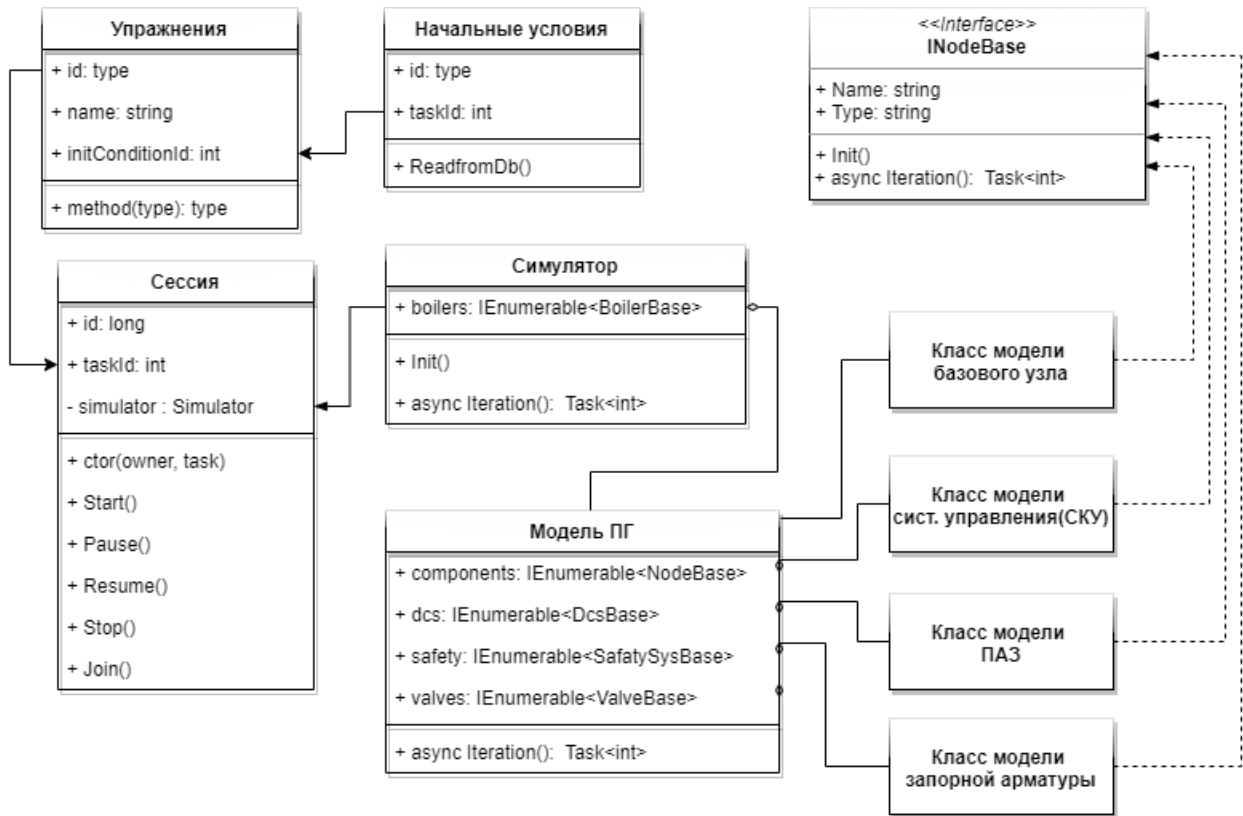


Рисунок 4. – Диаграмма классов компьютерной модели

Листинг 1. Структура итерационного метода

```
protected async Task<int> Iteration()
{
    await Task<int>.Run(() =>
    {
        //код вычисления итерации
    });
    return 0;
}
```

В приведенном листинге запускается в новом потоке задача, и её завершение будет связано с ожиданием возвращения какого-нибудь целого значения, являющего признаком или статусом вычислительной процедуры.

Такой же метод *Iteration()* есть и у экземпляра симулятора, и идея заключается в каскадном вызове методов *Iteration()* от симулятора до компонентов моделей ПГ. Но, чтобы обеспечить эффективное распараллеливание вычислительных процедур и выполнение условия (4), в работе предлагается использовать технологию параллельных запросов LINQ. Для этого все компоненты, кото-

рые имеют метод *Iteration()* размещаются в пулах (коллекциях). Фрагмент вызова итерационных методов из пула приведен в листинге 2.

Листинг 2. Вызов итерационных методов из пула

```
protected async Task<int>
Iteration()
{
    //выбираем итерационные методы в
    //пул задач
    IEnumerable<Task>
    calcIterationTasks =
    _boilers.Select(boiler =>
    boiler.Iteration());
    //запускаем задачи расчета итерации
    await
    Task.WhenAll(calcIterationTasks);
    //и ждем окончания их выполнения
    return 0;
}
```

В листинге 2 полем *_boilers* объявлен пул моделей ПГ, реализованный с помощью списка:

```
private List<BoilerBase> _boilers;
```

Анализ профилирования центрального процессора при запуске приложения сервера моделирования показал эффективность распараллеливание потоков и равномерную загрузку вычислительных ядер, что подтвердило правильность выдвинутой гипотезы и оп-

тимистичность прогнозов оптимального использования кибернетической мощности вычислительной системы при моделировании работы оборудования ТЭЦ-1 Котласского ЦБК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M V Krivov. The concept of building training systems for training operators of liquefied hydrocarbon warehouses/. M V Krivov, A G Kolmogorov, V Y Kobozev, N S Blagodarnyi, O V Sitosanova. // Journal of Physics: Conference Series, Volume 1680, Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics 7-9 September 2020, Tomsk State University, Tomsk, Russia

2. Концепция синтеза компьютерных тренажерных комплексов для подготовки

операторов / Кривов М.В., Колмогоров А.Г., Кобозев В.Ю., Благодарный Н.С. // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2020. № 14. С. 104-108.

3. Кривов М.В., Благодарный Н.С. Динамический структурный синтез тренажерных моделей / Кривов М.В., Благодарный Н.С., Кобозев В.Ю., Колмогоров А.Г. // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2016. Т. 1. № 1. С. 131-138.

УДК 517.925

Сенотова Светлана Анатольевна,

к.т.н., доцент, доцент кафедры «Вычислительные машины и комплексы»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», тел.: 89021723488

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ ОБРАТИМЫХ РЕАКЦИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

Senotova S.A.

ON STABILITY OF STATIONARY STATES OF REVERSIBLE REACTIONS OF THE FIRST ORDER

Аннотация. В статье рассматриваются обратимые реакции первого порядка. Записана система дифференциальных уравнений. Найден первый интеграл и стационарное состояние. С помощью прямого метода Ляпунова исследована устойчивость стационарного состояния.

Ключевые слова: Реакции первого порядка, дифференциальные уравнения, первый интеграл, стационарное состояние, прямой метод Ляпунова.

Abstract. The article discusses reversible first-order reactions. A system of differential equations is written. First integral and stationary state found. Using Lyapunov's direct method, stationary stability was investigated.

Keyword: First order reactions, differential equations, first integral, stationary state, direct Lyapunov method.

Обратимые реакции

Обратимые реакции состоят из прямой и обратной реакций, протекающих с разными скоростями. Для реакций первого порядка они имеют вид:



где k_1 и k_2 – константы скоростей соответственно прямой и обратной реакций, c_1 и c_2 – концентрации соответственно веществ A и B в текущий момент времени t . Концентрации веществ в начальный момент времени обозначим c_{10} и c_{20} .

К таким реакциям типа (1) относятся изомерные превращения в различных классах органических соединений.