DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-30-37

УДК 004.94

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВАРИАНТОВ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРОИЗВОДСТВА

DEVELOPMENT OF SIMULATION SYSTEM FOR ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL OPTIONS OF COAL MINING INDUSTRY

Зиновьев Василий Валентинович[1,2],
к.т.н., e-mail: zvv@coal.sbras.ru
Vasiliy V. Sinoviev [1,2], Ph.D.
Стародубов Алексей Николаевич [1,2]
к.т.н., e-mail: st_a_n@mail.ru
Alexey N. Starodubov [1,2], Ph.D.
Кравчук Сергей Вячеславович[2]
магистрант, e-mail: grey1406@mail.ru
Sergey V. Kravchuk [2], undergraduate
Гречишкин Павел Владимирович[3],
к.т.н.
Pavel V. Grechishkin[3], Ph.D.

[1]Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650000, Россия, г. Кемерово, пр. Ленинградский,10
[1]Institute of Coal FRC CCC SB RAS
[2]Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
[2]T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation
[3]Кемеровский филиал АО «ВНИМИ», Кемерово, Советский проспект, 63а, оф. 354.
[3]Kemerovo branch JSC VNIMI, Kemerovo, Sovetsky Avenue, 63a, office 354.

Аннотация: *В статье показана программная реализация системы имитационного моделирования очистных горных работ, основанной на разработанных с использованием теории сетей Петри модулей: «Работа комбайна», «Изменение положения шнеков», «Регулирование передвижки секций крепи», «Регулирование крепи сопряжения и конвейера». Разработаны и приведены алгоритмы программной реализации моделей работы основных элементов технологии ведения горных работ, а также их синтеза в единую модель, автоматически генерируемую в зависимости от введенных данных. Описаны интерфейсы программного комплекса: главная форма, форма выбора оборудования, форма ожидания во время моделирования и форма результатов, а также основные действия пользователя при работе с ними. При работе с системой проектировщик вводит данные о горно-геологических условиях, вводит или выбирает предлагаемое из базы данных оборудование и при необходимости корректирует отдельные элементы технологии ведения очистных работ. После запуска моделирования пользователь получает возможность в интерактивном режиме проигрывать на персональном компьютере различные организационно-технические варианты ведения очистных горных работ и выбирать рациональное решение, что в конечном итоге сократит дорогостоящие риски на стадии проектирования угледобывающего производства в целом.*

Abstract: *This article presents a software implementation of the simulation modeling system for the coal mining works based on modules developed using the theory of Petri nets: "Combine operation", "Changing the screw position", "Regulation of the support advancing", "Regulation of the face-end support and conveyor". The algorithms were developed and presented for software implementation of models for the operation of the main elements of mining technology and for their synthesis into a single model. The interfaces of the software complex are described: the main form, the form of equipment selection, the form of waiting during the simulation and the form of the results, as well as the basic actions of the user for working with them. When working with the system, the designer enters the data on mining and geological conditions, enters or selects the equip-*

ment proposed from the database and, if necessary, corrects certain elements of the technology of cleaning operations. After launching the simulation, the user is able to interactively play on the personal computer various organizational and technical options for coal mining operations and choose the rational solution that will eventually reduce at the design stage the costly risks of the coal mining production as a whole.

Ключевые слова: *сети Петри, имитационное моделирование, C#, очистные горные работы.*
Key words: *Petri nets, imitation modeling, C#, coal-face mining work*

Нагрузка на длинный очистной забой является важнейшим фактором, определяющим производительность угледобывающего производства в целом. Многообразие горно-геологических и горно-технических условий обуславливает множество вариантов организации работ в очистном забое, применяемого оборудования и его сочетаний. Поэтому при создании новых шахт, технологий, развитии и повышении эффективности горных работ возникают задачи анализа множества организационно-технических вариантов и выбора рационального решения. В настоящее время оборудование механизированного очистного забоя комплектуют исходя из прошлого опыта и интуиции, а параметры технологий рассчитывают, принимая серьезные допущения, т.к. существующие методы аналитических расчетов не позволяют учесть все аспекты ведения горных работ. Также варианты, просчитанные в статике, могут дать совсем иной результат в динамике, а пренебрежение случайными факторами (отказы оборудования, изменяющиеся горно-геологические условия, газовый фактор и др.) может в реальности дать существенные отклонения от планируемых показателей добычи. Выявлять эффективные технико-организационные решения экспериментальным путём невозможно из-за высокой стоимости. Целесообразно решение обозначенных задач методом имитационного моделирования.

В Федеральном исследовательском центре угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук разработан проблемно-ориентированный имитатор сетей Петри NETSTAR [1], при помощи которого созданы модули сетей Петри, позволяющие синтезировать динамические модели взаимодействия оборудования механизированного очистного забоя [2,3]. Синтез таких моделей и проведение на них имитационных экспериментов требуют от пользователя знаний теорий сетей Петри [8-12], моделирования, планирования эксперимента, статистической обработки данных, оптимизации, владения специализированным программным обеспечением [13-15]. Поэтому создание интуитивно понятной интерактивной системы имитационного моделирования организационно-технических вариантов

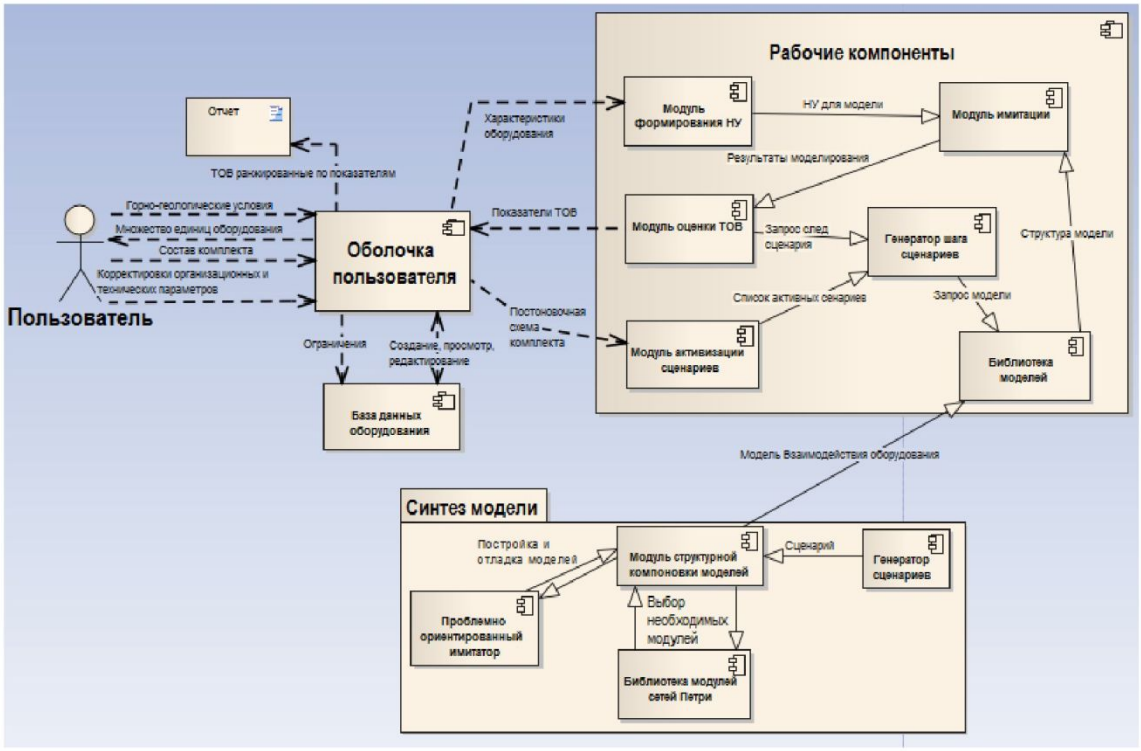

Рисунок 1 – Структурная схема системы имитационного моделирования
Figure 1 – Structural scheme of the simulation modeling system

угледобывающего производства, позволяющей специалисту горного профиля, не обладающему высокой квалификацией в области моделирования систем и программирования, проводить в интерактивном режиме эксперименты на персональном компьютере и находить лучшие организационно-технические варианты ведения очистных работ, является актуальной задачей.

Система имитационного моделирования должна обеспечивать:

- автоматизированный многовариантный анализ организационно-технических решений и выбор варианта очистных горных работ (включающий автоматический выбор и загрузку моделей, автоматический расчёт и формирование входных данных для каждой модели, проведение имитационного эксперимента, отображение и интерпретацию результатов моделирования);
- учёт динамики ведения очистных горных работ;
- возможность учёта случайного времени выполнения технологических операций и взаимодействия оборудования в пространстве горных выработок.

Также система должна включать базу данных с техническими характеристиками горного оборудования и отображением во встроенных каталогах машин, подходящих по горно-геологическим условиям.

Рисунок 2 – Алгоритм программной реализации модуля «Работа комбайна»
Figure 2 – Algorithm for software implementation of the module "Combine operation"

На рис. 1 представлена структурная схема системы имитационного моделирования, удовлетворяющая перечисленным требованиям.

Функционирует система следующим образом. Пользователь вводит горно-геологические условия (ГГУ), на основе которых в базе данных формируется список подходящего оборудования. Из него пользователь компонует механизированный комплекс и, по необходимости, корректирует значения временны́х характеристик. Модуль активизации сценариев строит возможные варианты организации работ в забое при заданном оборудовании. Модели из библиотеки загружаются в Модуль имитации. Модуль формирования начальных условий вычисляет необходимые параметры для каждой модели. Результаты моделирования поступают в Модуль оценки технико-организационных вариантов, где рассчитывается средне-цикловая производительность. Далее формируется отчёт, содержащий результаты в виде текстовой и графической информации.

Модули работы комбайна, передвижки секций крепи, передвижки конвейера, передвижки крепи сопряжения, изменения положения шнеков комбайна разработаны ранее на основе сетей Петри в работе [2,3]. Проведена программная реализация указанных модулей, а также создан ряд вспомогательных программных модулей для генерации моделей, их тестирования, завершения моделирования и других задач.

Например, модуль работы комбайна строится по алгоритму, представленному на рисунке 2. При вводе параметров определяются: название модуля, количество выходов модуля, количество элементарных отрезков пути (зависит от длинны лавы и шага установки секций), время задержки на каждом из них, переключатель старта. В блоке «загрузка из файла» в зависимости от варианта реализации выбирается программный модуль (для выбора введена переменная – количество выходов модуля). В блоке «изменение исходной позиции модуля» изменяются максимальная и текущая емкость позиции старта, в зависимости от переданного числа элементарных отрезков пути (ЭОП), также в этой позицию создаются первичные маркеры. Аналогично функционирует блок «изменение контрольной позиции». В блоке «изменение позиций-выходов» изменяются максимальные емкости исходных позиций модуля.

По указанному алгоритму модуль «Работа комбайна» программно реализован в файле векторов, xml-файле и программном коде. Фрагмент программной реализации алгоритма представлен на рисунке 3.

```
public ModelInClass GetHarvester(string name, int e, int n, double Try, bool start)
{
    ModelInClass Harvester = new ModelInClass();//создание модели
    switch (e)
    {
        case 1: { readXML("modelHarvesterWith1Exit.xml", ref Harvester); } break;
        case 2: { readXML("modelHarvesterWith2Exit.xml", ref Harvester); } break;
        case 3: { readXML("modelHarvesterWith3Exit.xml", ref Harvester); } break;
        default: { readXML("modelHarvesterWith1Exit.xml", ref Harvester); } break;
    }
    Harvester.name = name;
    Harvester.Pozs[0].Maxcount = n;
    Harvester.Pozs[0].Startcount = n;//изменения исходной позиции
    Harvester.Pozs[0].Tekcount = n;
    Harvester.Pozs[0].Markers = new Marker[n];
      ..............................
    if (e == 3)
    {
        Harvester.Pozs[4].Maxcount = n;
        Harvester.Pozs[4].Markers = new Marker[n];
        Harvester.Pozs[5].Maxcount = n;
        Harvester.Pozs[5].Markers = new Marker[n];
    }
    return Harvester;
}
```

Рисунок 3 – Фрагмент кода модуля «Работа комбайна»
Figure 3 – Code fragment of the «Combine operation» module

Подобным образом проведена программная реализация модулей «Работа комбайна», «Изменение положения шнеков», «Регулирование передвижки секций крепи», «Регулирование крепи сопряжения и конвейера».

Модуль синтеза моделей работает следующим образом. После выбора оборудования пользователем и ввода начальных условий, программа формирует имитационные модели: создаются необходимые блоки, в которые записываются введенные пользователем данные, создаются связи между блоками модели. Для создания каждого типа модулей создан алгоритм его получения в зависимости от введенных данных. На рисунке 4 приведен алгоритм синтеза модели очистных работ с челноковой работой комбайна и самозарубкой косым заездом.

В блоке «Вычисление переменных» вычисляются значения переменных (число ЭОП, относительная длинна комбайна, время перемещения комбайна на расстояние одного ЭОП, время передвижки одной секции крепи, количество участков конвейера и других) в зависимости от выбранного оборудования.

Рисунок 4 – Алгоритм синтеза модели очистных работ с челноковой работой комбайна и самозарубкой косым заездом
Figure 4 – Algorithm for the synthesis of models for coal mining works with the shuttle work of the combine and self-cutting in a slanting cut)

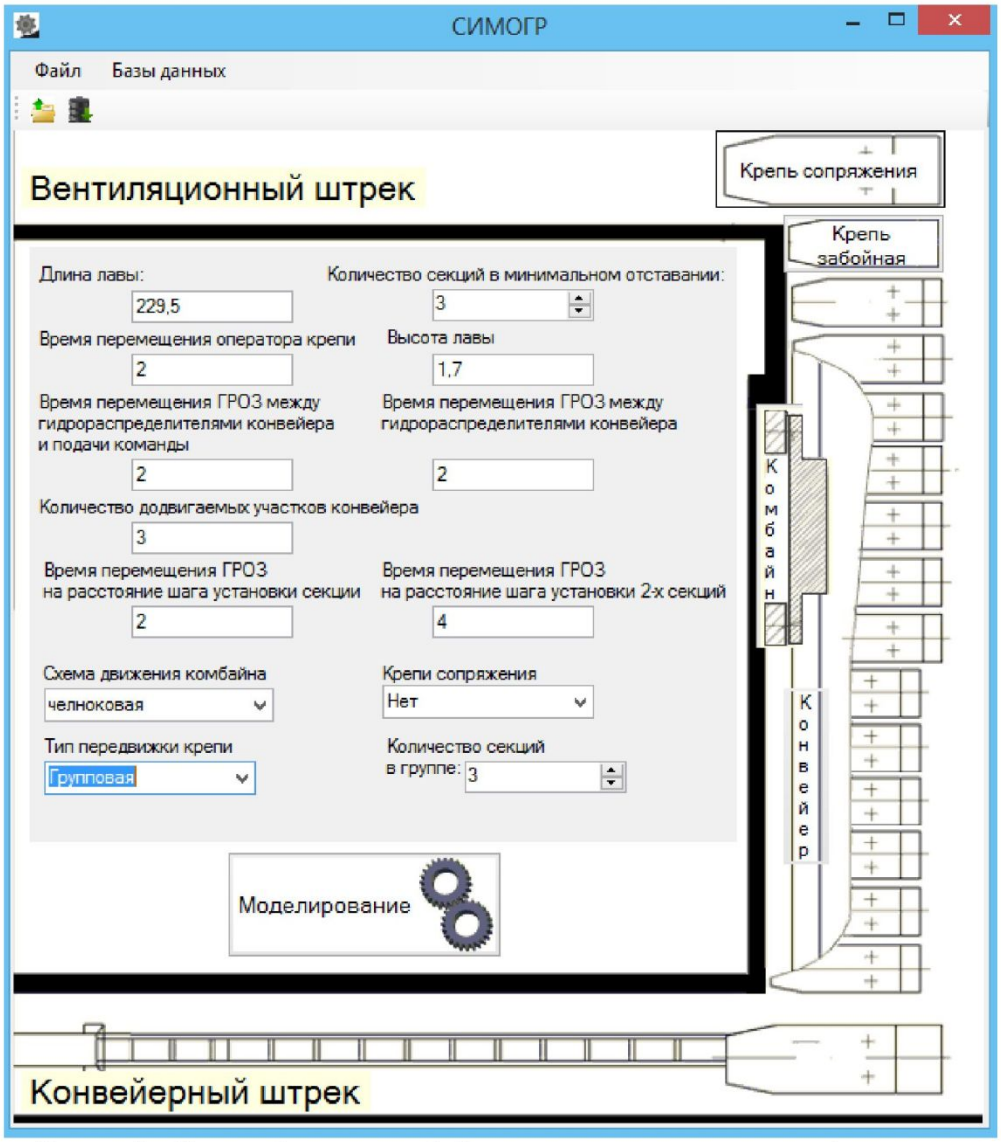

Рисунок 5 – Главная форма интерфейса системы имитационного моделирования
Figure 5 – Main form of the interface of the simulation modeling system

Данный алгоритм позволяет построить модели 12 разных конфигураций в зависимости от крепей сопряжения (без крепей сопряжения, с вентиляционной крепью сопряжения, с конвейерной крепью сопряжения, с обеими крепями сопряжения) и типа передвижки забойной крепи (последовательная, групповая, шахматная).

При «загрузке модуля передвижки крепи» в зависимости от выбранного типа передвижки крепи, загружаются соответствующие модули.

При заполнении модели данными все параметры сначала переносятся в класс-агрегатор MiningModel, а затем различные параметры передаются алгоритмам получения модулей, также эти параметры используются при формировании связей между модулями.

Таким образом синтезируется модель, которая в дальнейшем используется для проведения имитационного эксперимента.

Разработанный интерфейс системы имитационного моделирования содержит 4 формы: главная форма, форма выбора оборудования, форма ожидания во время моделирования и форма результатов. Главная форма (рис. 5) предназначена для начала работы, ввода параметров, перехода к выбору оборудования из базы данных, составления и прогона моделей.

На форме доступны следующие действия:

- Ввод данных о лаве (серая панель в центре формы);
- Переход к выбору оборудования из базы данных (рис. 6). Для каждого типа оборудования своя кнопка («Крепь сопряжения», «Крепь забойная», «Комбайн», «Конвейер»);
- Переход к прогону моделей (кнопка «Моделирование»);
- Загрузка проведенного эксперимента («файл – загрузить проведенный эксперимент», иконка «загрузка файла»);

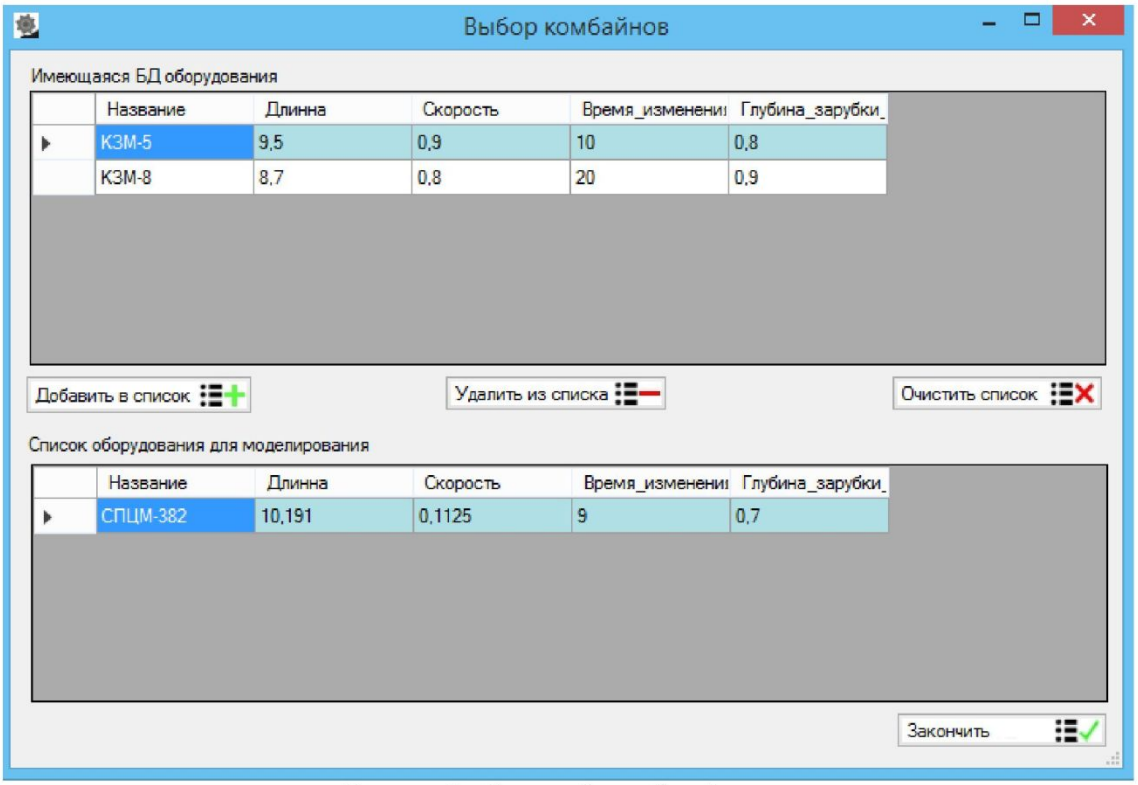

Рисунок 6 – Окно выбора оборудования
Figure 6 – The equipment selection window

- Редактирование баз данных оборудования.

В зависимости от того, какое оборудование необходимо выбрать, в окне выбора загружаются разные данные, однако процесс выбора оборудования из представленного списка происходит однотипно:

- в верхней части появляется полный список доступного оборудования;
- при нажатии на кнопку «Добавить в список», выбранное в списке оборудование добавляется в нижний список (список выбранного оборудования) и удаляется из верхнего.
- при нажатии кнопки «Удалить из списка», выбранное во втором списке оборудование,

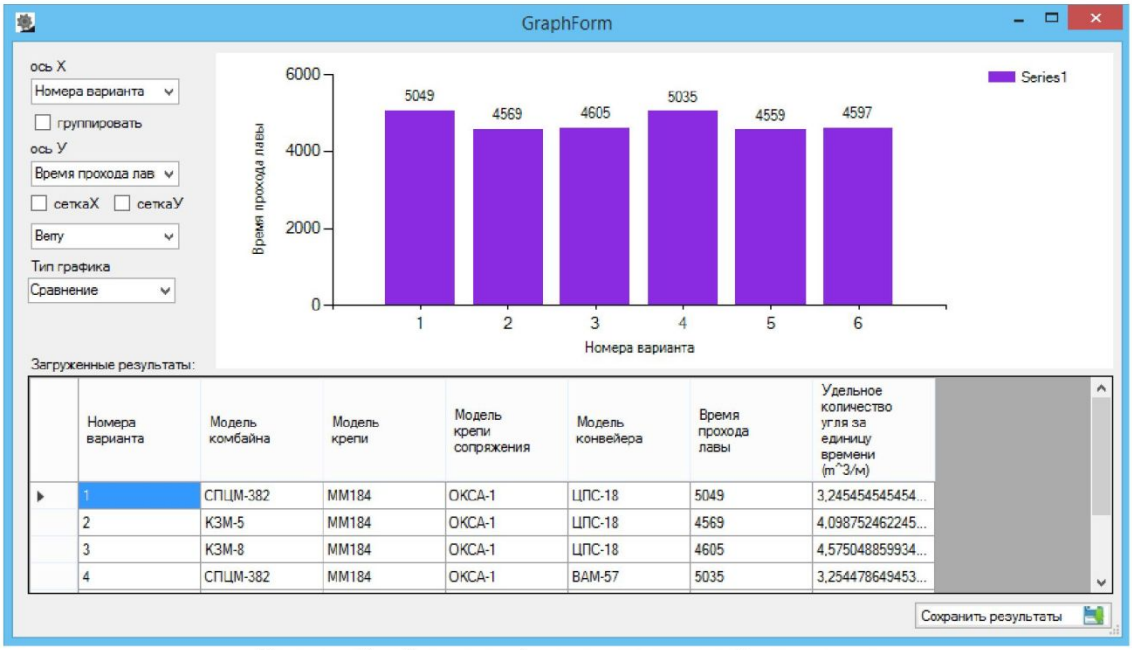

Рисунок 7 – Окно вывода результатов моделирования
Figure 7 – Simulation results output window

возвращается в верхний список.

- при нажатии на кнопку «Очистить список» все оборудование из нижнего списка удаляется и возвращается в верхний.
- при нажатии кнопки «Закончить» все оборудование из нижнего списка передается в главную форму для дальнейшей обработки.

Нажатием кнопки «Моделирование» пользователь проводит запуск указанных выше алгоритмов, происходит генерация моделей, запускается имитация и формирование результатов с выводом их в специальном окне (рис. 7).

В появившемся окне представляется возможность проанализировать результаты моделирования (определить влияние типа оборудования на общее время моделирования, оценить варианты ведения работ). Форма дает возможность динамически перестраивать график в зависимости от переменных, выбранных для анализа. Например, зависимость объема добытого угля от типа комбайна или от варианта применяемой технологии. Также имеется возможность отображения разных вариантов на одном графике. Результаты моделирования можно экспортировать в фай Excel для дальнейшей обработки.

Таким образом, разработана система имитационного моделирования, позволяющая в интерактивном режиме проигрывать на персональном компьютере различные организационно-технические варианты ведения очистных горных работ и выбирать рациональное решение, что в конечном итоге сократит дорогостоящие риски на стадии проектирования угледобывающего производства в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конюх В.Л. Имитатор NETSTAR / В.Л. Конюх, Михайлишин А.Ю., В.В. Зиновьев, А.Н. Стародубов / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010617178 от 27.10.2010 г.),

2. Гречишкин П.В. Имитационное моделирование технологических схем очистных работ// Сборник докладов первой Всероссийской научно-практической конференции «Опыт практического применения языков и программных систем имитационного моделирования в промышленности и прикладных разработках» (23-24 октября 2003, С.-Петербург). С.-Петербург, 2003. С. 38-43.

3. Гречишкин П. В. Динамическое моделирование взаимодействия оборудования механизированного очистного забоя. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Институт угля и углехимии СО РАН. Кемерово, 2005.

4. Конюх В.Л. Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. – 243 с.).

5. Зиновьев В.В. Практическое применение программных средств имитационного моделирования / В.В. Зиновьев, П.В. Гречишкин // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2007): Сб. трудов III Всероссийск. научно-практич. конф. (17-19 октября 2007). - СПб: ФГУП «ЦНИИ технологии судостроения», 2007. - С. 78-82.

6. E. Best, R. Devillers, M. Koutny, Petri Net Algebra, New York:Springer-Verlag, 2001.

7. Yrvann Emzivat, Benoît Delahaye, Didier Lime and Olivier H. Roux: Probabilistic Time Petri Nets. International Conference on Applications and Theory of Petri Nets and Concurrency 2016: Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. pp 261-280.

8. Мурата Т. Сети Петри: свойства, анализ и приложения. – Тр. ТИИИЭР, пер. с англ. Т. 77. № 4. 1989. С. 41–79.

9. Z. W. Li, M. C. Zhou, Deadlock Resolution in Automated Manufacturing Systems: A Novel Petri Net Approach, New York : Springer-Verlag, 2010.

10. Конюх В. Л. Предпроектный анализ шахтных робототехнических систем / В.Л. Конюх, О. В. Тайлаков. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1991. - 182 с.

11. Решетова Т.А. Разработка подсистемы моделирования проблемно-ориентированного имитатора сетей Петри для проектирования очистных работ на угольных шахтах / Т.А. Решетова, А.Н. Стародубов // Сборник материалов IX Всерос., 62 научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая», 18-21 апр. 2017 г., Кемерово [Электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева»; редкол.: О. В. Тайлаков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2017.

12. W. Aalst, C. Stahl, Modeling Business Processes: A Petri Net-Oriented Approach, MA, Cambridge : MIT Press, 2011.

13. Шалыто А.А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления СПб.: Наука,1998. 628 с.

14. C# Programming Yellow Book - Rob Miles, «Cheese» Edithion 8.1. October, – 2016.

15. Ричард Берд Жемчужины проектирования алгоритмов. Функциональный подход. – Москва:ДМК Пресс, 2013. – 330 с.

REFERENCES

1. Konyukh V.L. Imitator NETSTAR / V.L. Konyukh, Mikhaylishin A.Yu., V.V. Zinov'ev, A.N. Starodubov / Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2010617178 ot 27.10.2010 g.),

2. Grechishkin P.V. Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh skhem ochistnykh rabot// Sbornik dokladov pervoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Opyt prakticheskogo primeneniya yazykov i programmnykh sistem imitatsionnogo modelirovaniya v promyshlennosti i prikladnykh razrabotkakh» (23-24 oktyabrya 2003, St.-Peterburg). St.-Peterburg, 2003. pp. 38-43.

3. Grechishkin P. V. Dinamicheskoe modelirovanie vzaimodeystviya oborudovaniya mekhanizirovannogo ochistnogo zaboya. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, Institut uglya i uglekhimii SO RAN. Kemerovo, 2005.

4. Konyukh V.L. Diskretno-sobytiynoe modelirovanie podzemnykh gornykh rabot / V.L. Konyukh, V.V. Zinov'ev. - Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2011. – p. 243).

5. Zinov'ev V.V. Prakticheskoe primenenie programmnykh sredstv imitatsionnogo modelirovaniya / V.V. Zinov'ev, P.V. Grechishkin // Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2007): Sb. trudov III Vserossiysk. nauchno-praktich. konf. (17-19 oktyabrya 2007). - SPb: FGUP «TsNII tekhnologii sudostroeniya», 2007. - pp. 78-82.

6. E. Best, R. Devillers, M. Koutny, Petri Net Algebra, New York:Springer-Verlag, 2001.

7. Yrvann Emzivat, Benoît Delahaye, Didier Lime and Olivier H. Roux: Probabilistic Time Petri Nets. International Conference on Applications and Theory of Petri Nets and Concurrency 2016: Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. pp 261-280.

8. Murata T. Seti Petri: svoystva, analiz i prilozheniya. – Tr. TIIIER, per. s angl. T. 77. № 4. 1989. pp. 41–79.

9. Z. W. Li, M. C. Zhou, Deadlock Resolution in Automated Manufacturing Systems: A Novel Petri Net Approach, New York : Springer-Verlag, 2010.

10. Konyukh V. L. Predproektnyy analiz shakhtnykh robototekhnicheskikh sistem / V.L. Konyukh, O. V. Taylakov. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd., 1991. – p.182.

11. Reshetova T.A. Razrabotka podsistemy modelirovaniya problemno-orientirovannogo imitatora setey Petri dlya proektirovaniya ochistnykh rabot na ugol'nykh shakhtakh / T.A. Reshetova, A.N. Starodubov // Sbornik materialov IX Vseros., 62 nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Rossiya molodaya», 18-21 apr. 2017 g., Kemerovo [Elektronnyy resurs] / FGBOU VO «Kuzbas. gos. tekhn. un-t im. T. F. Gorbacheva»; redkol.: O. V. Taylakov (otv. red.) [i dr.]. – Kemerovo, 2017.

12. W. Aalst, C. Stahl, Modeling Business Processes: A Petri Net-Oriented Approach, MA, Cambridge: MIT Press, 2011.

13. Shalyto A.A. Switch-tekhnologiya. Algoritmizatsiya i programmirovanie zadach logicheskogo upravleniya SPb.: Nauka,1998. P.628.

14. C# Programming Yellow Book - Rob Miles, «Cheese» Edithion 8.1. October, – 2016.

15. Richard Berd Zhemchuzhiny proektirovaniya algoritmov. Funktsional'nyy podkhod. – Moskva:DMK Press, 2013. – p.330.

Поступило в редакцию 20.04.2018
Received 20.04.2018