

<sup>1</sup>АО «Научно-производственная корпорация  
«Космические системы мониторинга,  
информационно-управляющие  
и электромеханические комплексы  
имени А. Г. Иосифьяна»,  
г. Москва

<sup>2</sup>Московский государственный  
технический университет  
имени Н. Э. Баумана (национальный  
исследовательский университет),  
г. Москва

<sup>3</sup>АО «Московский  
машиностроительный завод «Авангард»,  
г. Москва

## ДИНАМИЧЕСКОЕ НОРМИРОВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СБОРКИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Работа посвящена созданию агентной модели, предназначеннной для расчета времени, затраченного сотрудниками на сборочный этап техпроцесса изготовления оборудования для АЭС. В статье акцент делается на потребность в данной разработке, констатируется оправданность исследования и развития области атомной энергетики, приводятся подтверждающие факты. В работе показываются различные подходы к определению производительности работников. За базовую берется концепция постепенного наращивания усталости работника на каждом этапе техпроцесса. В модели агентами являются работники и технологический процесс. Показываются составные части программы, реализованной на языке С#, даются описания классов, их функционирование для имитации поведения агентов производственной системы. Диаграмма классов показывает выделенные классы и связи между ними с точки зрения наследования. Проводится исследование функционирования модели на примере типового сборочного процесса — сборки каркаса шкафа, состоящего из семи основных операций. В работе отображены структурированные, эмпирически проанализированные значения категорий усталости и времени техпроцесса для 85 работников в графической форме по операциям. Показывается пример нарастания усталости для одного из работников и график Ганта, по которому можно оценить, как проходили операции во времени. В качестве выходных данных агентной модели приводится расчетное значение затраченного времени за весь этап техпроцесса сборки оборудования для АЭС. Аргументируется точность расчетов сходимостью данных, полученных в средах Matlab Mathworks и Microsoft Excel при ручном моделировании. В заключение констатируется небольшое отклонение выходных данных разработанной агентной модели от практического эксперимента, выполненного в рамках реализации контракта на создание оборудования для нового энергоблока, проводится причинно-следственный анализ. Также в заключение разобраны экстремальные значения некоторых данных работников и акцентируется внимание на неоправданность применения классических усредненных подходов при анализе общей производительности, приводятся соответствующие примеры. Дается справка о возможности применения агентной модели в смежных областях.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, динамическое нормирование, агентное моделирование, сборка, технологический процесс.

**Введение.** Мир в XXI веке постоянно развивается и ускоряется. Современные гаджеты, компьютерные устройства, мощные промышленные роботы, системы автоматизации так или иначе базируются на электронике. При этом необходимо уменьшать энергетические затраты оборудования. С учетом вышесказанного отмечается тенденция роста потребности в энергоресурсах. Именно поэтому необходим мониторинг энергетических затрат с применением современных технологий. Хорошим примером является концепция автоматизированного комплекса, созданного в работе [1], состоящего из измерительных, передающих и вычислительных устройств. Нельзя также пропустить и теоретические подходы к анализу ситуаций на рынке энергоресурсов. Применение агентного моделирования для анализа и прогнозирования потребностей в энергоресурсах, предложенного в работе [2], очень актуально.

Несмотря на противоречивую точку зрения и общественную дискуссию об атомных технологиях, строительство и использование АЭС является оптимальным решением проблемы увеличения потребности в энергоресурсах по мнению авторов работ [3–5]. Безопасность подобных объектов при соблюдении всех стандартов будет также на очень высоком уровне [6].

Кроме того, при использовании незадействованного потенциала комплексов возможно обогревать как близлежащие города и села водяными ресурсами [7], так и сельхоз области [8]. В случае строительства АЭС в засушливых зонах, которых крайне мало в Российской Федерации [9], это приведет также к улучшению микроклимата данной территории вследствие появления дополнительных водохранилищ.

Однако атомные комплексы возводят достаточно продолжительное время [10], из-за чего ввод в эксплуатацию нового блока или станции происходит не ранее чем через 5 лет, о чем также свидетельствует информация документа [11].

В результате появляется необходимость решить многоэтапную задачу, состоящую из увеличения количества блоков и ускорения строительства АЭС. Если первую часть реализует государство в части политики развития энергетического комплекса, то ускорение технологического процесса зависит от предприятий-поставщиков оборудования.

К сожалению, на данный момент в компаниях зачастую применяются устаревшие подходы к управлению предприятиями и внутренними организационными структурами. Составление план-графиков на них ведется на основании опыта, с учетом неоправданно огромного задела. Также часто встречаются расчеты времени по среднестатистическому значению для человека [12]. Все перечисленное приводит к замедлению сроков изготовления конечного продукта. Поэтому возникает потребность в создании эффективной модели для нормирования технологического процесса.

Как известно, технологический процесс изготовления высокотехнологичной продукции, к которой в полной мере относится оборудование для АЭС, состоит из множества этапов. Оптимизация времени создания изделий должна происходить на каждом из них.

**1. Метод.** В разрабатываемой имитационной модели взаимодействие осуществляется между двумя типами агентов: технологический процесс и сотрудники.

Технологический процесс характеризуется последовательностью операций и значением штучного времени для каждой операции, изменяющейся со временем, вследствие влияния накопления усталости, и находится по формуле, разработанной в работе [13], основанной на принципах теории управления [14–16]:

$$\begin{aligned} i_j &= \sum_{v=1}^{17} x_v + 2J_{1v} \\ \bar{X} &= \sum_{j=1}^{17} \sum_{v=i_j}^{i_j} t_j \prod_{\mu=1}^j L_{\mu}^{i_j-v} + \\ &+ \sum_{j=18}^{23} \sum_{\delta=i_j}^{i_j} t_j \prod_{\mu=18}^j L_{\mu}^{i_j-\delta} \prod_{v=1}^{17} L_v^{x_v-v}. \end{aligned} \quad (1)$$

Как уже было заявлено, уравнение учитывает динамику работоспособности по показателю производительности труда. Причем ее изменение может как характеризоваться возрастанием производительности до перерыва, достигая своего максимума через некоторое время, так и рассчитываться методом усредненного значения, полученного путем продолжительного анализа конкретного сотрудника за некоторый интервал исследуемого времени.

Также важно отметить, что данный подход несколько отличается от классического расчета техпроцесса, находящегося по формуле:

$$T_{um} = T_O + T_B + T_{TO} + T_{OO} + T_P, \quad (2)$$

где  $T_O$  — основное время, затраченное на выполнение технологических переходов;

$T_B$  — вспомогательное время, которое затрачивается на перемещение, изменение позиции, замену инструмента, измерение и подгонку;

$T_{TO}$  — время на техническое обслуживание рабочего места, затрачиваемое на регулировку, правку, смену инструмента, уборку;

$T_{OO}$  — время на организационное обслуживание для подготовки рабочего времени;

$T_P$  — время на регламентированные перерывы.

Для моделирования поведения агентов необходимо задать законы распределения, по которым выполняются операции технологического процесса каждым отдельным работником.

Сотрудники в модели будут выполнять работу в соответствии с технологическим процессом, но с учетом индивидуальных характеристик производительности и утомляемости. Параметры агента (installer) определяются статистическими характеристиками: производительность (productivity) каждого агента определяется по нормальному закону распределения; утомляемость (tiredness) может соответствовать рис. 1 в случае применения первого подхода.

**2. Описание модели.** Разработана агентная модель сборки оборудования для атомных комплексов, которая осуществляется в режиме единичного непрерывно функционирующего производства.

Разработана программа на языке C#, которая позволяет имитировать поведение агентов производственной системы. Диаграмма классов показывает выделенные классы и связи между ними с точки зрения наследования.

Класс **Program** — класс, с которого начинается работа приложения. Статистический класс **RandomGenerators** содержит набор методов для генерации случайных чисел в соответствии с различными законами распределения (равномерный закон распределения, закон Гаусса, закон Вейбулла и пр.). Класс **Statistic** — содержит свойства и методы для

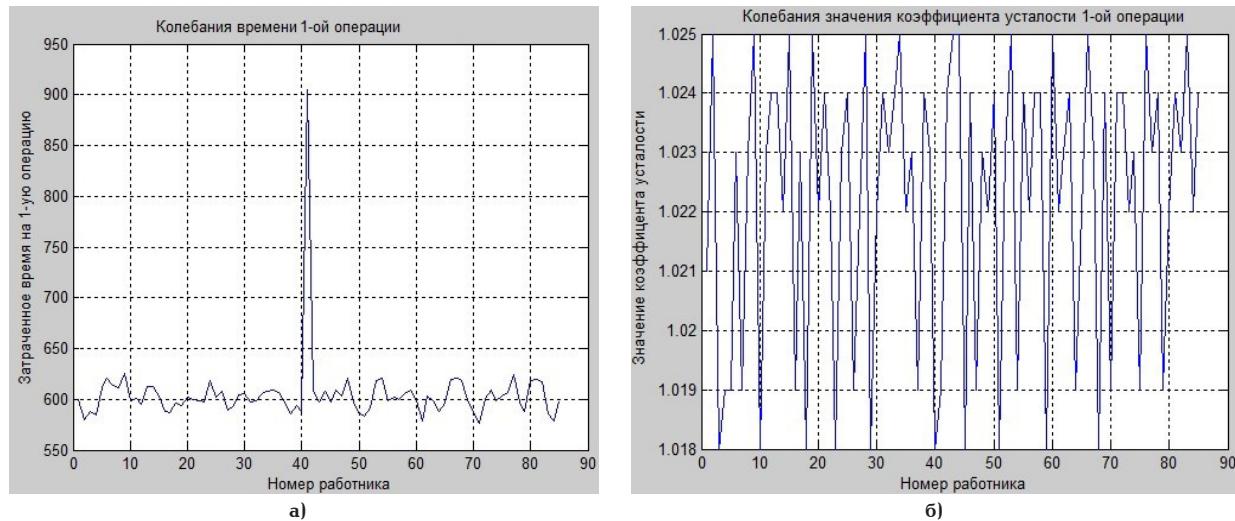


Рис. 1. Время и усталость 1-й операции

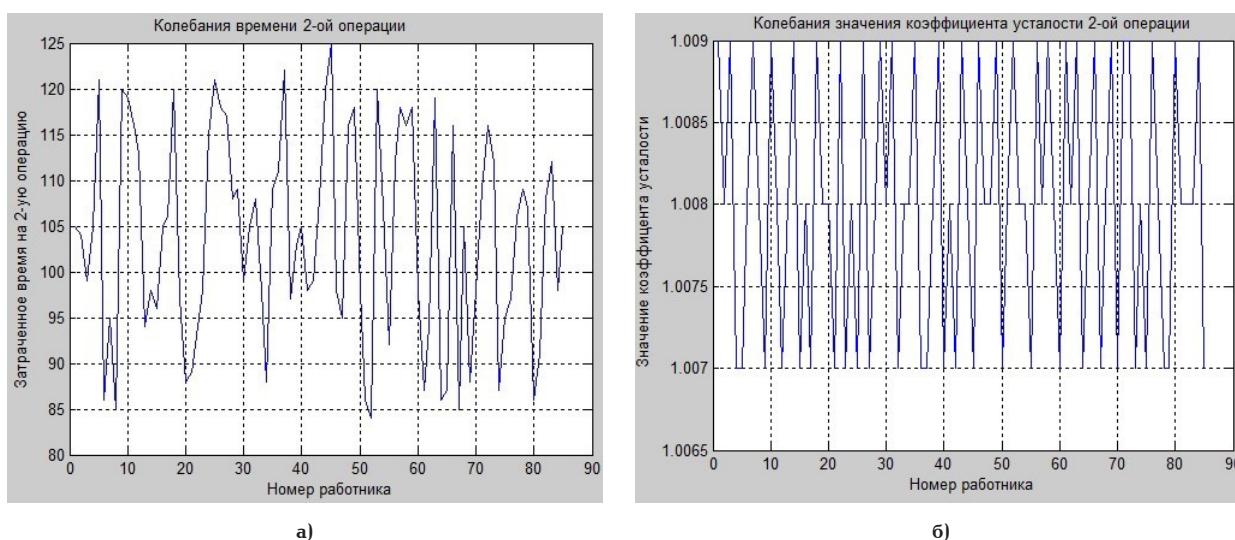


Рис. 2. Время и усталость 2-й операции

сбора и обработки статистической информации в процессе имитационного моделирования. Класс **CommonDenial** описывает общую логику обработки организационно-технического отказа. Данный класс наследует следующие классы: *ProductionLine*, *Store*, *WorkPlace*. Класс **ProductionLine** — модель, которая содержит массив продуктов (собираемых изделий) и массив рабочих мест (объектов класса *WorkPlace*). Класс **WorkPlace** — модель рабочего. Каждый рабочий имеет порядковый номер, параметр усталости, модель отказов. Класс **ProductionSet** — класс, имитирующий технологический процесс с разным набором операций, соответствующих спецификаций, и временем их выполнения. Класс **ExcelUtilities** содержит утилиты для построения графиков в MS Excel.

Имитационное моделирование работы агентов сборочного цеха выполняется итерационно. У каждого из классов (*AssemblyDepartment*, *Store*, *ProductionLine*, *WorkPlace*), описывающих основные элементы сборочного цеха, есть метод *RunIteration*, который задает логику выполнения одной итерации.

Время итерации для основного класса сборочного цеха *AssemblyDepartment* продолжается в течение времени, заданном в секундах в параметре *timeTotal*, а шаг изменения времени указан в секун-

дах в параметре *timeDelta*. По умолчанию выбраны значения *timeTotal* =  $8 \cdot 60 \cdot 60 = 28800$  с (одна рабочая смена) и *timeDelta* = 1 с.

Работа программы начинается с создания экземпляра класса *AssemblyDepartment* и экземпляра класса *Statistic*. Во время создания экземпляра класса *AssemblyDepartment* обнуляются счетчики времени и количества собранных изделий, генерируется новая производственная партия. Во время инициализации создается заданное количество рабочих мест.

После инициализации запускается цикл итераций для экземпляра класса *AssemblyDepartment* посредством вызова метода *RunIteration*. В рассматриваемом примере моделируется 250 итераций, т.е. один год работы сборочного цеха (при условии работы в одну 8-часовую смену — что задается в переменной *timeTotal*). После каждой итерации в экземпляре класса *Statistic* записываются измеряемые параметры остальных объектов модели.

Метод *RunIteration* класса *AssemblyDepartment* представляет собой цикл от нуля до времени, указанного в *timeTotal* с шагом *timeDelta*. Внутри цикла происходит последовательный вызов метода *RunIteration* для объектов *initialStore*, *finalStore* и *productionLine*.

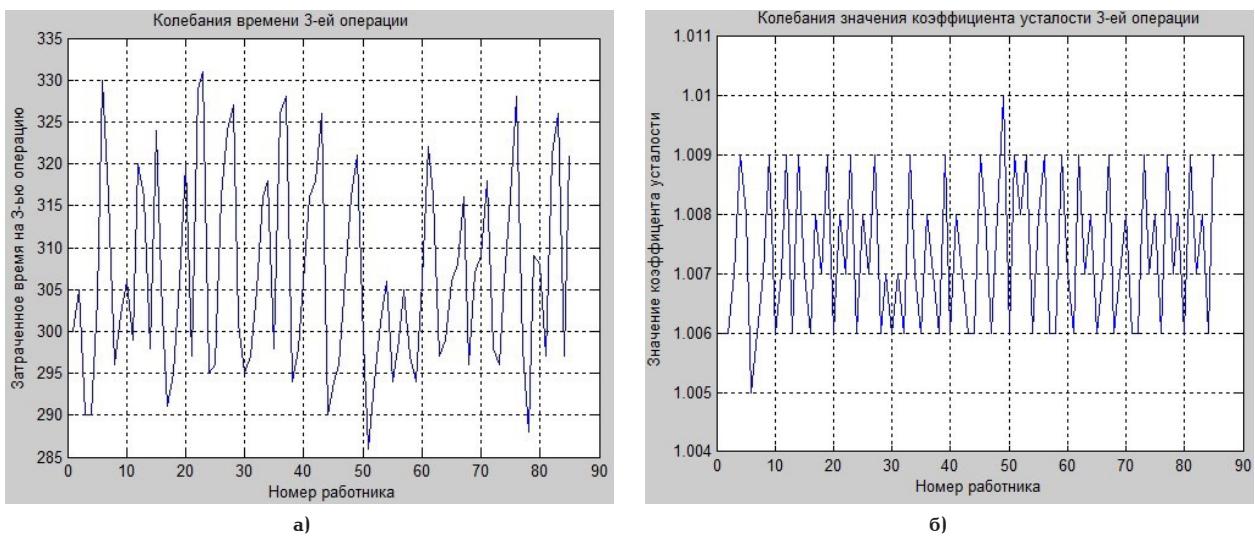


Рис. 3. Время и усталость 3-й операции

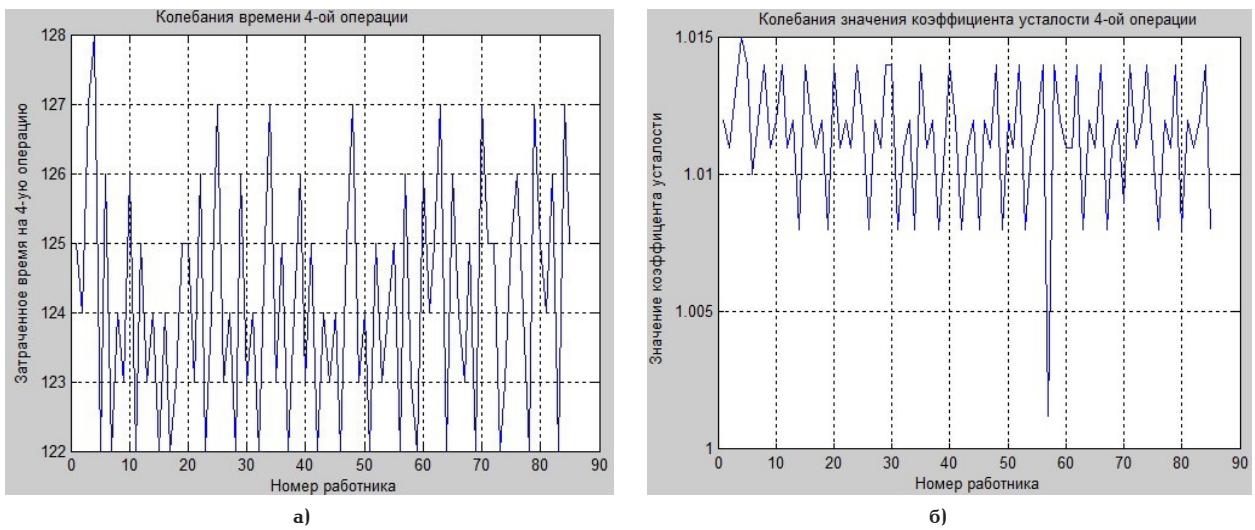


Рис. 4. Время и усталость 4-й операции

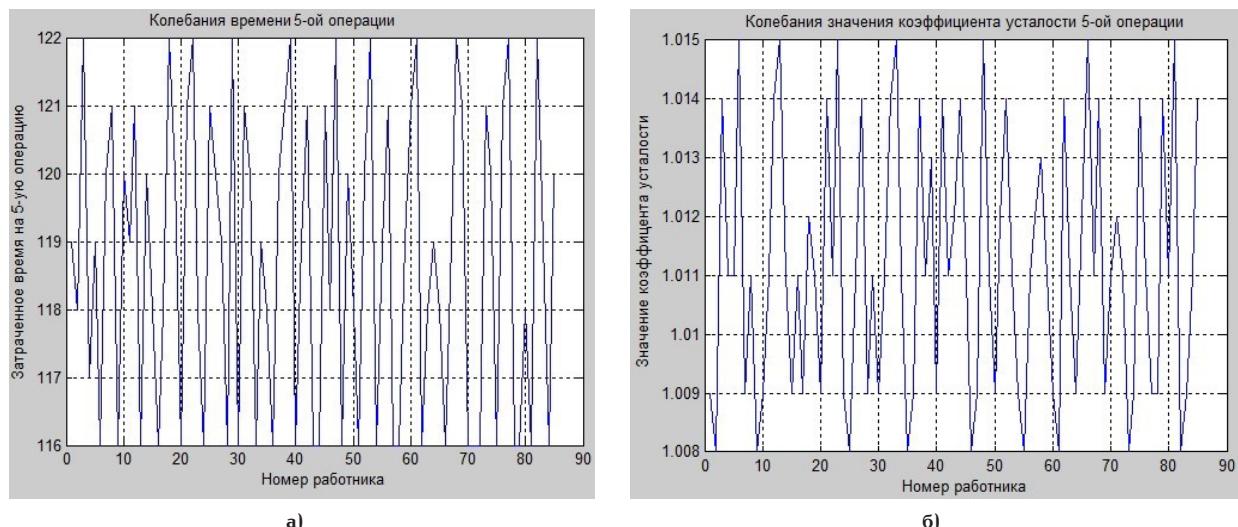


Рис. 5. Время и усталость 5-й операции

**3. Исследованные параметры.** Проверку работоспособности модели проводили по примеру одного из типовых сборочных процессов — сборки каркаса. Техпроцесс состоял из следующих операций:

1. С каркаса снимаются все стенки и двери;
2. С каркаса снимаются четыре усилительных уголка;
3. В двери сверлится одно отверстие;

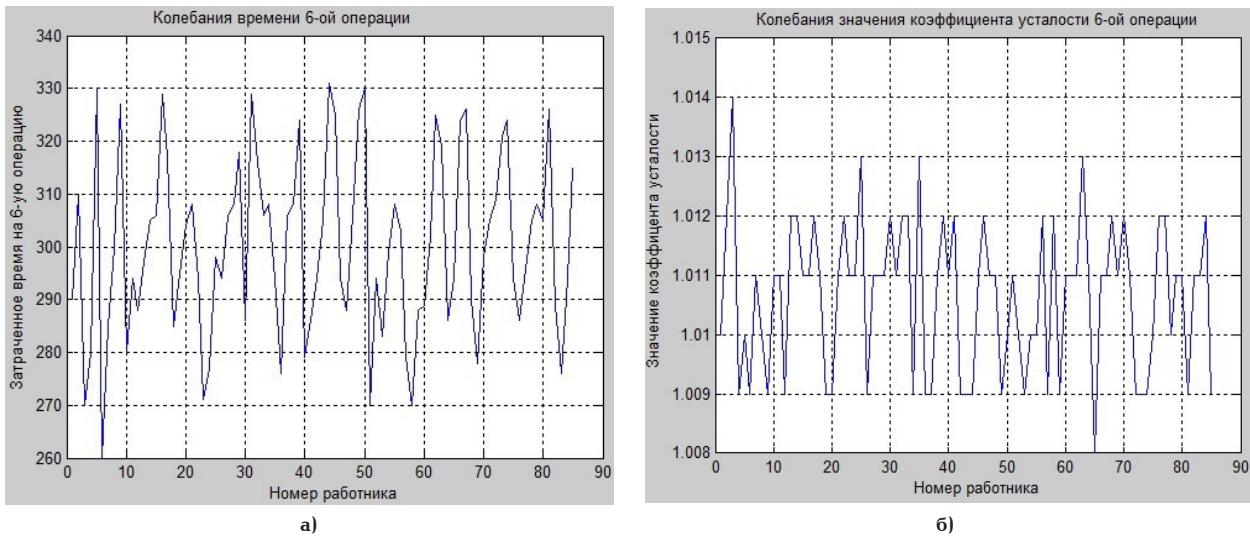


Рис. 6. Время и усталость 6-й операции

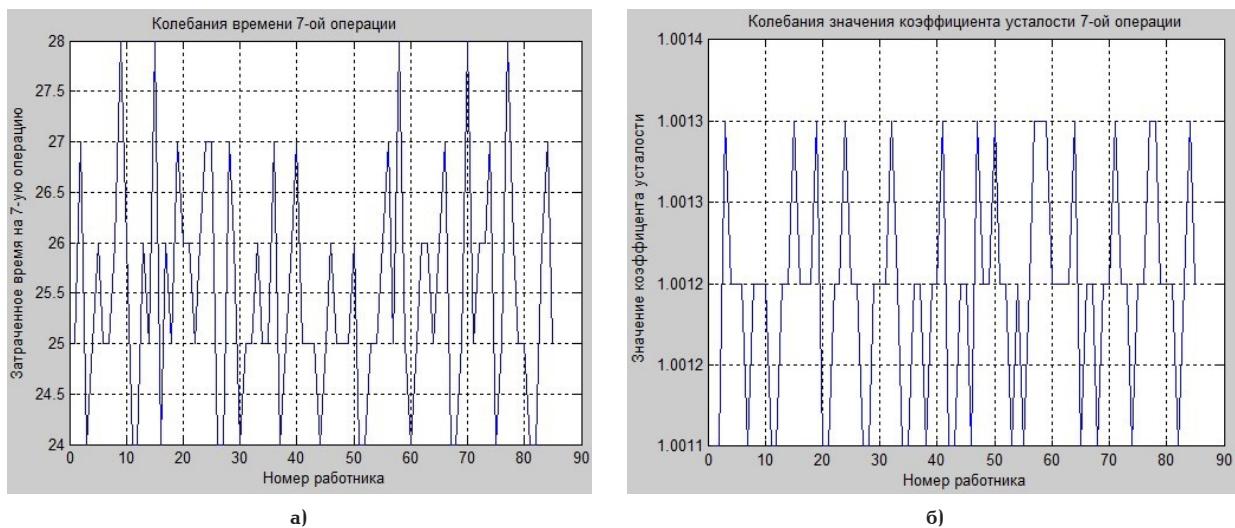


Рис. 7. Время и усталость 7-й операции

4. Внутрь шкафа устанавливаются 30 деталей / сборок, купленных у предприятия-изготовителя;

5. Устанавливаются три простые детали, изготовленные в цеху корпорации;

6. Устанавливается одна среднесложная сборка, изготовленная в цеху корпорации;

7. Крепление элементов 100 самонарезающих винтов.

Поскольку для уравнения предварительно необходимо было найти параметры затраченного времени и коэффициента усталости, проведено исследование 85 сотрудников и получены графики распределения, показанные на рис. 1–7. Где «а» — время, затраченное на операцию, «б» — коэффициент усталости.

В результате были получены данные, по которым можно провести сравнение об оптимальности применения, при выполнении этапа техпроцесса, конкретного сотрудника. Расчетные значения относительно данных указанного примера показаны на рис. 8.

Данные, полученные в агентной модели и реализованные на C#, совпали с расчетами в средах Matlab Mathworks и Microsoft Excel (расчетом методом подстановки значений напрямую в командную строку в первом случае и с применением встро-

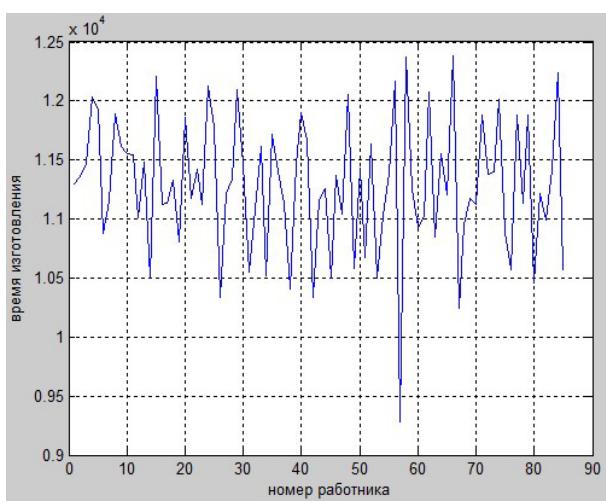


Рис. 8. Время сборочного техпроцесса

енного математического аппарата, работающего со столбцами во втором случае).

**Заключение.** При моделировании техпроцесса сборки оборудования для АЭС были получены данные, которые совпали с реально затраченным вре-

менем. Сотрудники 12 и 37, в рамках реализации контракта по созданию нового блока для Нововоронежской АЭС, имели отклонения от расчетного значения, не превышающие 8,4 %, причем замедление было вызвано различными нештатными ситуациями, которые изначально не закладывались при моделировании, хотя данный функционал имеется в агентной модели.

Рассматривая результаты, особое внимание стоит уделить «выбросам» входных переменных и их значениям при применении разработанной имитационной модели. Для этого рассмотрим данные по 41-му сотруднику, который справлялся с первой работой наиболее продолжительное время — 905 сек, (на данной операции работник более чем на треть превысил среднее значение времени работы или более чем на 250 сек второго по низкой производительности сотрудника). Причина столь долгого исполнения кроется в возрастном параметре работника — более 80 лет.

Как видно из описания операций, данному работнику было необходимо снять со шкафа достаточно тяжелые панели. В результате анализа по стандартным методикам отмеченного сотрудника следовало бы вывести из технологического процесса и заменить на более производительного, однако это было бы неверным решением. Если рассмотреть рис. 8, который показывает общее время выполнения техпроцесса, можно заметить, что по общей производительности работник превысил даже средние значения времени и показал более чем хороший результат. Стоит также отметить хорошее распределение полученных данных, которое несложно математически посчитать.

С другой стороны, обратимся к 57 сотруднику, который на четвертой операции имел наименьшее значение параметра накопления усталости. В данном случае, рис. 8 показал схождение указанных «всплесков». Объясняется это накопительным эффектом усталости. Кроме того, работник обладал идеальными данными — возраст порядка 30 лет, образование профильное, хорошие показатели чтения конструкторской документации. В результате можно сделать вывод о немалой важности именно параметра усталости и его, зачастую, решающем значении при оценке времени изготовления изделия, которое «усредняющие» подходы опускает.

Тем самым можно сделать вывод, что агентная модель может использоваться не только как средство вычисления общего затраченного времени с целью использования наиболее оптимальных человеческих ресурсов на различных этапах техпроцесса, но и как средство оценки эффективности параметра усталости при решении обратной задачи.

Разработанная модель также может применяться при моделировании техпроцессов на других машиностроительных предприятиях, тем самым авторы подчеркивают ее не узкоспециализированность, хотя и отмечают возможную потребность в дополнительных корректировках входных и возмущающих данных.

Исследования по тематике будут продолжены.

#### Библиографический список

- Семенов А. С. Мониторинг и оценка потребления энергетических ресурсов // Экономические и управлеческие технологии XXI века: теория и практика, подготовка специалистов: материалы методической и науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 20 ноября 2020 года. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский гос. ун-т промышленных технологий и дизайна. 2020. С. 98 – 102. ISBN 978-5-91646-192-3.
- Суслов С. А., Кондратьев М. А., Сергеев К. В. Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы // Проблемы управления. 2010. № 2. С. 46 – 52.
- Loskutov I. A. Causes for protracted production of equipment for nuclear power plants // Information Innovative Technologies: Materials of the International scientific — practical conference. Prague. 2018. P. 392 – 396.
- Ansolabehere S. [et al.]. The future of nuclear power. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003. 170 p.
- Schneider M. [et al.]. World Nuclear Industry Status Report 2014. Paris, London, Washington, 2014. 158 p.
- Johnston G., Duchag A. The Development of the New Idea Safety Guide for Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants // Reliability: Theory & Applications. 2017. № 1 (44), Vol. 12. P. 57 – 65.
- Билибинская АЭС // АО «Концерн Росэнергоатом». URL: [https://www.rosenergoatom.ru/stations\\_projects/sayt-bilibinskoy-aes/](https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-bilibinskoy-aes/) (дата обращения: 07.07.2021).
- Циглевкина К. Н., Черных Д. О., Ташлыков О. Л. Возможность применения сбросной теплоты АЭС в тепличном хозяйстве // Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров-2016: материалы науч.-практ. конф., Екатеринбург, 11 октября 2016 года. Екатеринбург: Изд-во Уральского федер. ун-та им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2016. С. 176 – 177
- «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году»: гос. докл. Москва: НИА-Природа, 2018. 298 с.
- Пергаменщик Б. К. Проблемы и перспективы строительства АЭС // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 140 – 153.
- Managing the First Nuclear Power Plant Project // IAEA-TECDOC-1555. Austria, 2007. 108 p.
- Сулейманова К. Р. Обзор стилей управления, применяемых на предприятии // ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика. 2015. № 4. С. 143 – 147.
- Лоскутов И. А. Нормирование сборочно-монтажных работ на предприятиях, разрабатывающих радиоэлектронное оборудование для АЭС // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. Т. 46, № 2. С. 89 – 97. DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-89-97.
- Trentelman H. L., Stoerovogel A. A., Malo H. Control theory for linear systems. Berlin: Springer, 2001. 389 p.
- Sontag E. D. Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional Systems. Second Edition. New York: Springer, 1998. 530 p.
- Leigh J. R. Control theory. Second edition. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 303 p.

**ЛОСКУТОВ Иван Андреевич**, инженер-конструктор АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы имени А. Г. Иосифьяна», г. Москва; преподаватель политехнического колледжа им. Н. Н. Годовикова, г. Москва; магистрант гр. М21-506 10.04.01 Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Москва.  
AuthorID (РИНЦ): 1648-9871  
Адрес для переписки: faxvex@ya.ru  
**СКВОРЦОВА Дарья Александровна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная логистика» Московского государственного технического

университета имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва.

AuthorID (РИНЦ): 897545

Адрес для переписки: [darya\\_skv@mail.ru](mailto:darya_skv@mail.ru)

**ИСКАНДАРОВА Венера Геннадьевна**, инженер по организации и нормированию труда АО «Московский машиностроительный завод "Авангард"», г. Москва; аспирант Московского государственного технологического университета «СТАНКИН», г. Москва.

Адрес для переписки: [veneramilachka@gmail.com](mailto:veneramilachka@gmail.com)

#### Для цитирования

Лоскутов И. А., Скворцова Д. А., Искандарова В. Г. Динамическое нормирование с использованием метода агентного моделирования процесса сборки оборудования для атомных электростанций // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 46 – 52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-46-52.

Статья поступила в редакцию 25.05.2022 г.

© И. А. Лоскутов, Д. А. Скворцова,

В. Г. Искандарова