УТВЕРЖДАЮ:
Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики
им. Л.А.Мелентьева Сибирского отделения
Российской академии наук,
член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор

Валерий Алексеевич Стенников
«18» декабря 2020 г.

Отзыв

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А.Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук – на диссертацию Сидорова Станислава Михайловича «Полумарковские и скрытые марковские модели систем с резервом времени», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Актуальность проблемы. В процессе проектирования и при эксплуатации систем любой природы и различного назначения большое внимание уделяется обеспечению требуемого уровня надежности этих систем, который определяет возможность качественного выполнения системой ее функций. Существуют различные способы повышения надежности систем, основным из них является резервирование. Одним из способов является временное резервирование, которое получило широкое распространение как требующее сравнительно меньших затрат в сопоставлении его с другими видами резервирования и позволяющее существенно повысить надежность системы. Для систем с временным резервированием нарушение работоспособности системы необязательно сопровождается ее отказом, так как имеется возможность восстановить работоспособность системы за резервное время.

Существенный вклад в исследование надежности систем с резервом времени внесли многие исследователи, однако анализ, выполненный автором, показывает, что этот метод резервирования исследован недостаточно по сравнению с другими и требуются дополнительные исследования в этой области. При этом в качестве инструмента исследований надежности систем с временным резервированием автор развивает полумарковские и скрытые марковские модели надежности, существующие реализации которых не дают возможности эффективно решать рассматриваемый автором класс задач.

С учетом сказанного актуальность темы исследования С.М. Сидорова не вызывает сомнений.

Целью рассматриваемой диссертационной работы является разработка и развитие методов математического моделирования восстанавливаемых технологических систем с резервом времени и их моделей на основе полумарков-

НПТС
Вх. № 415
29 12 2020
Подпись

ских процессов с общим фазовым пространством состояний и скрытых марковских моделей. Для достижения этой цели автором сформулированы соответствующие задачи.

Научная новизна исследований и полученных результатов состоит в том, что впервые:

1. Разработаны полумарковские модели двух- и многокомпонентных систем с поэлементным резервом времени и получены расчетные формулы их характеристик надежности и эффективности.
2. Разработаны полумарковские модели производительности технологической ячейки с учетом наличия мгновенно пополняемого резерва времени и получены расчетные формулы производительности.
3. Разработана методика построения скрытой марковской модели на основе укрупненной полумарковской модели с резервом времени.
4. На основе предложенной методики разработаны скрытые марковские модели систем с резервом времени, допускающих построение полумарковской модели.
5. Разработаны компьютерные программы расчета характеристик надежности систем с резервом времени, а также решения задач, связанных со скрытыми марковскими моделями.

Практическая значимость и реализация результатов диссертационной работы заключаются в следующем:

Разработанные полумарковские и скрытые марковские модели позволяют анализировать влияние величины резерва времени на характеристики надежности и эффективности систем различного назначения. Кроме того, полученные формулы позволяют решать оптимизационные задачи распределения резерва времени между элементами системы. Разработанные скрытые марковские модели позволяют прогнозировать состояния системы и находить наиболее вероятные состояния на основе полученного вектора сигналов.

С использованием разработанных полумарковских и скрытых марковских моделей выполнен анализ надежности и эффективности нефтепровода с поэлементными резервуарными парками.

Обоснованность и достоверность научных выводов, положений и рекомендаций подтверждаются корректным использованием математического аппарата теории вероятностей, теории надежности, методов математического моделирования, теории интегральных уравнений, теории принятия решений, строгостью вывода аналитических формул, апробацией на научно-технических конференциях.

Заключение о соответствии диссертации установленным критериям. Диссертационная работа С.М. Сидорова в полном объеме отвечает критериям, которые установлены «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а именно:

- Указанная диссертантом *цель работы* – разработка и развитие методов математического моделирования восстанавливаемых технологических

систем с резервом времени и их моделей на основе полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний и скрытых марковских моделей *достигнута в представленной диссертационной работе.*

- *Автореферат диссертации* С.М. Сидорова *соответствует диссертационной работе* по всем квалификационным признакам: по цели и задачам исследования; по основным положениям, выносимым на защиту; по определению актуальности, научной значимости, новизны, практической ценности и др.
- *Основные выводы и результаты диссертационной работы соответствуют поставленным задачам исследований* и сформулированы автором структурно логично и содержательно.
- *Научные публикации* С.М. Сидорова, изданные в период работы над диссертацией, *соответствуют тематике диссертационной работы* и с достаточной полнотой отражают ее суть, основные результаты и выводы.
- *Тема и содержание диссертации* С.М. Сидорова *соответствуют паспорту специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ* (далее курсивом по тексту паспорта):

- по направлению исследования, связанному с разработкой и развитием методов математического моделирования восстанавливаемых технологических систем с резервом времени и их моделей на основе полумарковских процессов с общим фазовым пространством состояний и скрытых марковских моделей в части *«...разработки фундаментальных основ и применения математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения научных и технических, Фундаментальных и прикладных проблем...»* в соответствии с формулой специальности;

- по областям исследования в соответствии с пунктами паспорта специальности:

п.1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;

п.2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей;

п.5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента;

- по объектам исследования – восстанавливаемые технологические системы с временным резервированием в части *разработки новых математических методов моделирования объектов и явлений, развития качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей, комплексных исследований научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.*

Анализ содержания диссертации.

Диссертация С.М. Сидорова состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка условных сокращений, списка условных обозначений, списка использованной литературы (149 наименований) и 10-ти приложений. Общий объем работы составляет 221 стр. Основной текст работы изложен на 138 страницах, включает13 таблиц и 14 рисунков.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, методология и методы исследования. Сформулированы положения, выносимые на защиту, представлены апробация результатов исследования и личный вклад автора.

В **первой главе** анализируется производительность технологической ячейки с учетом наличия мгновенно пополняемого резерва времени. Построена математическая модель функционирования технологической ячейки с прекращением обработки единицы продукции, а также полумарковская модель функционирования технологической ячейки без прекращения обработки единицы продукции. Выполнен анализ влияния резерва времени на производительность технологической ячейки, для чего сформулирована система уравнений с целью нахождения стационарного распределения вложенной цепи Маркова. При этом рассмотрены случаи резерва времени общего вида, экспоненциального и постоянного резерва времени.

Вторая глава посвящена разработке полумарковской модели двухкомпонентной системы с поэлементным резервом времени. Рассматриваются принципы построения полумарковской модели системы, а также нахождение стационарного распределения и средних времен пребывания в состояниях вложенной цепи Маркова. Разработан метод стационарного фазового укрупнения двухкомпонентной системы. Рассматриваются особенности построения полумарковской модели двухкомпонентной системы. Сформулирован метод нахождения приближенных стационарных характеристик надежности исследуемой системы с поэлементным резервом времени.

В **главе 3** исследуется общий случай многокомпонентной системы с поэлементным мгновенно пополняемым резервом времени. Рассматривается построение полумарковской модели для этого случая, а также нахождение стационарного распределения вложенной цепи Маркова. Разработаны методы нахождения стационарных характеристик надежности и эффективности многокомпонентной системы с поэлементным мгновенно пополняемым резервом времени. Исследуются особенности реализации этих методов для случаев параллельного и последовательного соединения элементов. В качестве примера применения разработанного подхода рассматривается расчет характеристик надежности и эффективности нефтепровода с резервуарными парками.

В **четвертой главе** рассматриваются скрытые марковские модели систем на основе укрупненных полумарковских моделей систем с резервом времени. Анализируется скрытая марковская модель системы с поэлементным резервом времени. Обсуждаются проблемы, возникающие при решении задач

теории скрытых марковских моделей. На основе полученных результатов формулируется скрытая марковская модель системы с групповым мгновенно пополняемым резервом времени. Для этого решается задача построения укрупненной полумарковской модели рассматриваемой системы. Далее формируется скрытая марковская модель на основе укрупненной полумарковской модели. При этом выполняется анализ характеристик и прогнозирование состояний укрупненной полумарковской модели.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы:

1. На стр. 17 и в приложении Б диссертации вводится система интегральных уравнений. Для преобразования системы и построения решения автор использует метод последовательных приближений и ряды. При этом сходимость метода и рядов не доказана. Нет и четких условий на класс функций, в котором задаются исходные данные и ищется решение системы интегральных уравнений.

2. В п. 2.2 рассматривается метод стационарного асимптотического фазового укрупнения пространства состояний двухкомпонентной системы, суть которого заключается в разбиении пространства состояний на классы и представлении каждого класса одним укрупненным состоянием. Представлены формулы для определения средней стационарной наработки системы на отказ и среднего стационарного времени восстановления. Приведены результаты расчетов для исследуемой системы, которые показывают погрешность метода менее одного процента. Остается неясным, какой критерий использован для выделения классов состояний и какой алгоритм классификации использован. Кроме того, на основе одного примера судить о точности метода укрупнения состояний системы, видимо, следует с оговорками.

3. В п. 3.4 достаточно подробно рассмотрено практическое применение разработанных методов на примере анализа надежности и эффективности однониточного нефтепровода с поэлементными резервуарными парками. С учетом этих результатов утверждается, что при соответствующей переформулировке задачи использованный подход может быть применен, в том числе, для электроэнергетической системы с накопителями электроэнергии. При этом, не рассматривается случай использования вращающегося резерва генерирующей мощности для создания резерва времени. Ведь фактически и накопитель электроэнергии, и вращающийся резерв генератора выполняют одну и ту же функцию: компенсацию потерянной мощности в результате отказа работающего агрегата. Желательно получить комментарии автора по этому вопросу.

4. Для более удобного чтения и анализа диссертации, помимо списка условных сокращений и списка условных обозначений, было бы полезно привести словарь основных терминов и определений. Следует отметить, что упомянутые списки условных сокращений и условных обозначений весьма лако-

ничны. Кроме того, имеются разночтения в тексте: например, в списке условных обозначений S обозначена как прибыль, а в тексте встречается, что это система, в другом месте – что это состояние.

Общее заключение. Представленная диссертационная работа С.М. Сидорова является самостоятельной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней решена важная научно-техническая проблема разработки моделей систем с резервом времени для оценки их надежности и эффективности. Составляющие проблемы объединены общей идеей развития математических моделей и численных методов, реализованных в виде соответствующих комплексов программ, для решения поставленной проблемы.

Содержание диссертации полностью соответствует заявленной цели и поставленным задачам и детально отражает последовательность их решения. Выводы и рекомендации работы изложены аргументировано. Основные научные результаты диссертации изложены в публикациях в индексированных базах цитирования Scopus и Web of Science.

Автореферат диссертации отражает ее содержание, которое полностью соответствует специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Сформулированные замечания имеют частный характер и не снижают в целом положительной оценки рассматриваемой диссертационной работы.

Диссертационная работа С.М. Сидорова полностью отвечает требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а соискатель безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Диссертационная работа и автореферат С.М. Сидорова обсуждены и одобрены на расширенном семинаре Отдела энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН 15 декабря 2020 года, протокол № 7.

Заместитель директора ИСЭМ СО РАН,
заведующий Отделом энергетической безопасности,
доктор технических наук
Сергей Михайлович Сендеров

Заведующий Лабораторией топливо- и энергоснабжения,
кандидат технических наук
Дмитрий Сергеевич Крупенёв

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)
Почтовый адрес: 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тел.: +7(3952) 42-47-00
E-mail: info@isem.irk.ru

Подпись Сендерова С.М. заверяю
Крупенева Д.С.
Заведующий канцелярией ИСЭМ СО РАН
Павлова Г.Ф.
18 12 2020 г.
расшифровка подписи

С отзывом ознакомлен.
30.12.2020
Сидоров С.М.

Сведения о ведущей организации

по диссертационной работе **Сидорова Станислава Михайловича** на тему **«Полумарковские и скрытые марковские модели систем с резервом времени»,** представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Полное и сокращённое наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)
Место нахождения	664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130
Почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, адрес официального сайта в сети Интернет	664033, Иркутская область, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 130, Тел. +7(3952) 500-646, +7(3952) 42-47-00 (приемная) E-mail: info@isem.irk.ru http://isem.irk.ru/
ФИО, должность подписавшего отзыв	Воропай Николай Иванович, научный руководитель, чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ (voropai@isem.irk.ru)
Основные публикации работников организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15)	1. Есяков С.Я., Лунин К.А., Стенников В.А., Воропай Н.И., Редько И.Я., Баринов В.А. Трансформация электроэнергетических систем // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. № 4 (55). С. 134-141. 2. Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сендеров С.М., Стенников В.А. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. 2019. № 1. С. 2-14. 3. Воропай Н.И. О целесообразности корректировки требований к надёжности по условиям устойчивости электроэнергетических систем // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2019. № 1 (80). С. 143-145. 4. Осак А.Б., Ефимов Д.Н., Жуков А.В., Панасецкий Д.А., Курбацкий В.Г., Сидоров Д.Н., Томин Н.В., Воропай Н.И. Комплекс интеллектуальных средств раннего выявления и предотвращения возникновения системных аварий в энергообъединениях // Автоматика и телемеханика. 2018. № 10. С. 6-25. 5. Воропай Н.И., Суслов К.В. Задачи обоснования развития активных систем электроснабжения // Промышленная энергетика. 2018. № 1. С. 2-6. 6. Voropai N.I., Chulyukova M.V. Transient stability problems of electic power syetems with distributed generation // Сборник докладов 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). С. 1-6. 7. Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В., Ломбарди П., Комарницки П. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 12. С. 157-168. 8. Воропай Н.И., Федотова Г.А. Направления и результаты исследований надежности систем энергетики // Надежность и безопасность энергетики. 2018. Т. 11. № 4. С. 280-287.

9. Воропай Н.И., Осак А.Б., Смирнов С.С. Анализ системной аварии 2016 г. в ЕЭС России, вызванной повреждением оборудования на Рефтинской ГРЭС // Электричество. 2018. № 3. С. 27-32.
10. Воропай Н.И., Чулюкова М.В. Анализ развития системной аварии в ОЭС Востока 1 августа 2017 г. // Электричество. 2018. № 5. С. 28-32.
11. Воропай Н.И., Клер А.М., Кононов Ю.Д., Санеев Б.Г., Сендеров С.М., Стенников В.А. Методические основы стратегического планирования развития энергетики // Энергетическая политика. 2018. № 3. С. 35-44.
12. Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология // Проблемы прогнозирования. 2017. № 5 (164). С. 39-49.
13. Воропай Н.И., Курбацкий В.Г., Томин Н.В., Панасецкий Д.А. Совершенствование системы мониторинга и управления электрическими сетями мегаполисов // Энергетик. 2016. № 8. С. 3-9.
14. Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Каратаев Б.Н., Новиков Е.А., Осак А.Б., Панасецкий Д.А. Адаптивные алгоритмы автоматики распределённого отключения нагрузки // Электрические станции. 2016. № 11 (1024). С. 27-35.
15. Айзенберг Н.И., Сташкевич Е.В., Воропай Н.И. Координация взаимодействия электроснабжающей организации и активных потребителей при оптимизации суточных графиков нагрузки // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 3. С. 15-25.
16. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество, 2020, № 7, с.12-21.
17. Массель Л. В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики / Энергетическая политика, 2018. № 5. – С. 30-42.
18. Liudmila Massel, Aleksey Massel. Intelligent support tools for strategic decision-making on Smart Grid development / International Conference “Green Energy and Smart Grids” (GESG 2018): Proceedings. Pp. 1-8. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186902009 (Scopus) https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/44/contents/ contents.html
19. Массель Л.В., Гальперов В.И. Анализ надежности работы многоагентных систем с использованием графовой модели / Вестник ИрГТУ. – 2017. №1– С. 72-80. (ВАК)
20. Massel L.V., Massel A.G. Intelligent system of semiotic type for decision-making support in Russia energy sector based on situational management conception /Proceedings of IV International scientific conference "Information technologies in science, management, social sphere and medicine" (ITSMSSM 2017)) // Advances in Computer Science Research (ACSR). Volume 72, 2017. - Pp. 423-429. https://www.atlantis-press.com/proceedings/itsmssm-17 (Scopus)
21. Solodusha S.V. Identification of input signals in integral models of one class of nonlinear dynamic systems // The Bulletin of

Irkutsk State University. Series Mathematic. 2019. Vol. 30. P. 73-82. DOI: https://doi.org/10.26516/1997-7670.2019.30.73

22. Solodusha S.V. To the numerical solution of one class of systems of the Volterra polynomial equations of the first kind // Numerical Analysis and Applications. 2018. Vol. 11. Iss. 1. P. 89-97. DOI: https://doi.org/10.15372/SJNM20180108

Директор ИСЭМ СО РАН
чл.-корр. РАН В.А.Стенников