



**Некоммерческое партнерство  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической системы»**

111 250, Москва, проезд Завода Серп и Молот,  
дом 10, офис 608, Тел. (495) +7 495 012 60 07  
E-mail: dtv@nts-ees.ru, <http://www.nts-ees.ru/>  
ИНН 7717150757

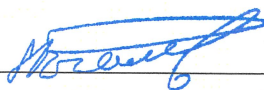


Основана в 1724 году

Российская Академия Наук  
Секция по проблемам НТП в энергетике  
Научного совета РАН по  
системным исследованиям в энергетике

**УТВЕРЖДАЮ**

Президент, Председатель  
Научно-технической коллегии,  
д.т.н., профессор

 Н.Д. Рогалев  
«10» октября 2023 г.

**ПРОТОКОЛ № 9**

совместного заседания Секции «Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и  
Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным  
исследованиям в энергетике

27 сентября 2023 года

г. Москва

**Присутствовали:** члены секции «Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС»,  
ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ», сотрудники НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»,  
ФГБУН «ИСЭМ СО РАН», ООО «РТСофт-СГ», ГБОУ ВО «Нижегородский  
государственный инженерно-экономический университет», ФГАОУ ВО  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский ГТУ им. Р.Е. Алексеева», ФГБОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет», ООО НПП «ЭКРА», всего **26** человек.

Со вступительным словом выступил председатель секции «Активные  
системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические  
ресурсы», руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических  
систем и распределенной энергетики ФГБУН «Институт энергетических

исследований РАН», д.т.н. Илюшин П.В.

Во вступительном слове было отмечено, что вопросы математического моделирования систем энергетики в условиях трансформации энергосистем, интеграции в пассивные распределительные сети большого количества локальных интеллектуальных энергосистем (миниGRID) и объектов распределенной генерации (РГ) является крайне актуальными. Использование современного математического аппарата для оценки структурной надежности различных схемно-режимных ситуаций, с учетом множества вариантов переконфигурирования сети, а также надежности электроснабжения потребителей и эффективности работы объектов (РГ), в том числе на основе ВИЭ, и систем накопления электроэнергии крайне востребовано. Это обусловлено тем, что преобразование пассивных распределительных сетей в активные приводит к невозможности визуального распознавания режимов и ручного управления сетями, учитывая особенности объектов РГ и электроприемников потребителей.

С докладом **«Моделирование систем энергетики на основе полумарковских и скрытых марковских моделей»** выступили Сидоров Станислав Михайлович, к.т.н., доцент кафедры «Высшая математика» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Соавтор доклада – Обжерин Юрий Евгеньевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Высшая математика» ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».

Основные положения доклада приведены ниже. Презентация доклада прилагается (**Приложение 1**).

1. На сегодняшний день «цифровизация» энергосистем и распределительных сетей, создание информационных систем управления ими и переход к интеллектуальному управлению и инжинирингу являются актуальными задачами теории и практики анализа и управления техническими системами и регламентируются на уровне государства. Решение этих задач возможно на основе построения математических моделей, касающихся различных аспектов структуры и функционирования систем. Отмечено, что для достижения поставленных целей необходимо регулярно оценивать и корректировать построенные математические модели, прогнозировать их состояние на основе информации, получаемой в процессе функционирования.

Анализ публикаций, индексируемых наукометрическими базами данных Scopus, Web of Science и РИНЦ, посвященных применению теории скрытых марковских моделей к моделированию систем энергетики, показал возрастающий с каждым годом интерес исследователей к данной области. Строгий и обоснованный математический аппарат, разнообразие областей применения и возможность использования результатов исследований для

создания систем искусственного интеллекта и поддержки принятия решений обосновывают актуальность исследования.

2. Представлены краткие сведения из теории полумарковских процессов и теории скрытых марковских моделей (СММ), используемые в настоящее время при моделировании технических систем. Представлен алгоритм построения СММ на основе полумарковской модели системы, позволяющий учитывать возможности и преимущества как теории СММ, так и теории полумарковских процессов для анализа надежности и эффективности систем энергетики.

3. Представлен пример применения суперпозиции независимых полумарковских процессов к моделированию энергосистем, демонстрирующий, во-первых, предлагаемую в докладе методологию, во-вторых, преимущества по сравнению с другими методами, заключающиеся в нахождении временных характеристик надежности и эффективности рассматриваемой системы (средней стационарной наработки на отказ; среднего стационарного времени восстановления и др.).

4. Основой эффективного управления техническим состоянием электрооборудования в активных системах распределения электроэнергии является должный учет всех процессов на каждом этапе жизненного цикла оборудования: проектирование, строительство, ввод в эксплуатацию, эксплуатация, в том числе, долгосрочная эксплуатация и консервация, а также вывод из эксплуатации. Эффективное управление процессом старения является одним из ключевых элементов безопасной и надежной эксплуатации объектов РГ на промышленных предприятиях.

5. Представлены модели систем энергетики с резервом времени:

5.1. Разработана полумарковская модель двухкомпонентной системы с поэлементным резервом времени. Получены расчетные формулы для нахождения стационарных характеристик надежности и эффективности, инвариантные относительно законов распределения случайных величин, описывающих систему.

5.2. Построены упрощенные модели функционирования системы из п. 5.1 с применением алгоритма стационарного фазового укрупнения и алгоритма асимптотического фазового укрупнения. В результате получены формулы для приближенного нахождения стационарных характеристик надежности и эффективности, позволяющие находить значения стационарных характеристик надежности и эффективности (для рассматриваемой системы) с абсолютной погрешностью не большей 0,1 % при различных входных данных модели. Важно отметить, что для систем с большим количеством компонентов рассмотренные приближенные алгоритмы дают результаты с погрешностью на уровне 2-3 %.

5.3. Разработана полумарковская модель многокомпонентной системы с

поэлементным мгновенно пополняемым резервом времени, позволяющая находить значения характеристик надежности и эффективности исходя из анализа структуры системы. Получены расчетные формулы для нахождения стационарных характеристик надежности и эффективности, инвариантные относительно законов распределения случайных величин, описывающих систему.

5.4. Результаты п. 5.3 использовались для расчета характеристик надежности и эффективности одноконтурного нефтепровода с резервуарными парками, выступающими резервом времени в рассматриваемой модели. Они позволяют решать оптимизационные задачи расстановки, наличия, необходимого значения резерва времени для достижения требуемых результатов. При технологической переформулировке задачи можно использовать данный математический аппарат для анализа надежности и эффективности системы газопровода с подземными хранилищами газа, системы водоснабжения с резервуарами на каждом участке, информационной системы с поэлементными хранилищами данных, активных систем распределения электроэнергии с распределенными накопителями электроэнергии.

5.5. Разработаны СММ укрупненной двухкомпонентной системы с поэлементным резервом времени и СММ системы с групповым мгновенно пополняемым резервом времени, которые использовались для оценки характеристик и прогнозирования состояний системы на основе полученного в процессе ее функционирования вектора сигналов.

Они позволяют:

- определять в каком классе состояний находилась модель в момент испускания последнего сигнала;
- находить вероятности появления сигнала  $j$  на следующем шаге для заданной цепочки сигналов;
- определять вероятности, с которыми модель осуществит переход в соответствующий класс на следующем шаге;
- рассчитать вероятность испускания (появления) заданного (полученного в результате функционирования) вектора сигналов;
- подобрать последовательность наиболее вероятные состояния модели таким образом, чтобы она лучше всего описывала вектор сигналов;
- находить параметры модели таким образом, чтобы они максимизировать значение вероятности появления заданной последовательности сигналов, при заданных параметрах модели (задача обучения модели).

6. Построена полумарковская модель автономного ветро-дизельного комплекса (ВДК), позволяющая рассчитать стационарные и временные характеристики надежности и эффективности. Затем на ее основе разработана

СММ, которая используется для нахождения оценок характеристик работы автономного ВДК и прогнозирования его состояний на основе полученного в результате его функционирования вектора сигналов. Результаты исследования позволят прогнозировать режимы работы автономного ВДК, переоценивать параметры построенной модели (обучать) для повышения ее адекватности, согласно получаемым в процессе функционирования сигналам.

7. Представлены результаты анализа влияния 4-х различных видов сигналов на оценку характеристик модели и прогнозирование состояний дублированной системы, используя построенную СММ на основе полумарковской модели дублированной системы, полученной в результате стационарного фазового укрупнения суперпозиции двух альтернирующих процессов восстановления. Результаты моделирования позволяют говорить о «схожести» различных множеств сигналов, исходя из их физического смысла, а также делать выводы об «информативности» сигналов. Это может быть использовано для определения необходимой информации и ее вида для получения требуемых характеристик скрытой модели на основе математического моделирования.

8. На примере моделирования физического участка цифрового учебного полигона (участок интеллектуальной распределительной электрической сети) проиллюстрированы возможности применения аппарата теории скрытых марковских моделей для оценки и прогнозирования его состояний и режимов работы, что позволило комплексно подойти к решению поставленных задач, повысив эффективность работы рассматриваемого участка.

#### **В обсуждении доклада и прениях выступили:**

Папков Б.В. (ГБОУ ВО «НГИЭУ»), Николаев В.Г. (АНО «НИЦ-«АТМОГРАФ»), Шихин В.А. (НИУ «МЭИ»), Илюшин П.В. (НП «НТС ЕЭС», ФГБУН «ИНЭИ РАН»).

**Папков Б.В.** – Профессор кафедры «Электрификация и автоматизация» ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», д.т.н., профессор.

Отметил, что следует более четко пояснять используемое в докладе понятие отказа системы. Для больших технических систем существует довольно много состояний «частичной работоспособности» и их нужно учитывать.

Обратил внимание, что в больших технических системах состояние отдельных элементов не определяют состояние всей системы, как для представленных в примерах систем, состоящих из относительно небольшого числа элементов.



Отметил, что не совсем понятна необходимость использования такого сложного математического аппарата по сравнению с классическими методами, если получаются идентичные результаты. Следует пояснить, что в данном случае речь идет о расширении получаемых характеристик и показателей.

Обратил внимание, что времена безотказной работы элементов системы являются относительными и переносить их на реальные системы энергетики в таком виде нельзя.

Отметил, что доклад заслуживает внимания, а представленный математический аппарат анализа и оценки состояний систем энергетики имеет широкую область применения.

**Николаев В.Г.** – Директор Автономной некоммерческой организации «Научно-информационный центр – «АТМОГРАФ», д.т.н.

Отметил важность программной реализации представленных моделей, что позволит вооружить системщиков и операторов эффективными методами расчета характеристик надежности и эффективности.

Обратил внимание на увеличивающуюся вычислительную сложность при росте количества элементов системы и необходимость оценки предела применимости разработанного подхода в зависимости от количества элементов и времени расчета.

**Шихин В.А.** – Заведующий научной лабораторией «Оптимизация и автоматизация энергетических и технологических систем» НИУ «МЭИ», к.т.н., доцент.

Обратил внимание, что при рассмотрении представленных моделей систем используются различные множества отказов, и следовало бы определить одно такое множество, общее для всех моделей.

Отметил важность укрупнения элементов систем энергетики, учитывая их физический смысл и особенности.

Обратил внимание, что следует уделить внимание не только формальному математическому описанию элементов, но и физическим процессам, происходящим в них, что будет особенно важно при дальнейших исследованиях.

**Илюшин П.В.** – Председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н.

Обратил внимание на необходимость исследования вопроса допустимости укрупнения (эквивалентирования) элементов в распределительных сетях, так как они имеют разные характеристики, степень влияния на режимы работы и

множество других ограничений.

Отметил, что проблемы могут возникнуть с эквивалентированием асинхронных двигателей в сетях 6 кВ, синхронных двигателей и асинхронных двигателей, которые, в том числе, вращают различные механизмы: поршневые насосы, центробежные насосы, молотковые дробилки, прокатные станы и др.

Обратил внимание, что применительно к системам теплоснабжения предлагаемый математический аппарат имеет прикладное значение, т.к. теплоноситель постепенно охлаждается, в системе присутствует инерционность, которую можно использовать как резерв времени. Однако, для систем электроснабжения, при условии отсутствия систем накопления электроэнергии, это сделать затруднительно.

Отметил, что в системе из двух трансформаторов, при отключении одного из них, второй перегружается и некоторое время система продолжит функционировать. Следовательно, перегрузочную способность трансформаторов и генераторов возможно использовать в качестве резерва времени.

Обратил внимание, что целесообразно рассматривать не общий резерв времени, а ввести в его рассмотрение во временных диапазонах, потому что в больших энергосистемах присутствуют абсолютно разные виды повреждений с различными временами восстановления, которые по-разному влияют на характеристики системы в целом.

Отметил, что при рассмотрении активных распределительных сетей на практике всегда существует какая-то ремонтная схема, т.е. какой-то элемент (узел) всегда поврежден или находится в ремонте (на восстановлении). Следует рассмотреть задачу определения наиболее уязвимого узла (ветви), восстановление которого необходимо в первую очередь, т.к. его выход из строя повлечет за собой отключение большого числа электроприемников.

Отметил, что предлагаемая методика и математический аппарат позволяют в перспективе разработать рекомендации по ремонтной программе и программе техперевооружения и реконструкции, учитывая влияние отдельных элементов (узлов) на надежность и эффективность функционирования системы.

Обратил внимание на целесообразность рассмотрения в дальнейших исследованиях математических моделей, учитывающие связанные, плавающие и двойные отказы, которые часто встречаются в системах энергетики и имеют важное практическое приложение.

Отметил, что результаты исследования анализа надежности и эффективности можно использовать для разработки системы поддержки принятия решений оперативно-технологическому персоналу, в зависимости от характера неисправностей, времени восстановления и влияния на систему, т.е.

разработать эффективный алгоритм обеспечения работоспособности и живучести сети при различных, даже самых сложных повреждениях.

Заслушав выступления экспертов по результатам дискуссии совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **отмечает:**

1. Важность и актуальность поднятой в докладе проблемы оценки надежности и эффективности функционирования электрооборудования в энергокомпаниях с активными системами распределения электроэнергии, с учетом временных характеристик анализируемых процессов.

2. Целесообразность и перспективность разработки систем поддержки принятия решений для оперативно-технологического персонала при возникновении различных нарушениях работоспособности отдельных единиц оборудования, применительно к конкретным системам энергетики, с учетом информации, поступающей в процессе их функционирования.

3. Целесообразность и перспективность применения разработанного подхода для определения стационарных характеристик надежности и эффективности функционирования технических систем, в частности для активных систем распределения электроэнергии, с целью достижения требуемых технических и экономических показателей.

4. Наличие в отечественной энергетике ряда важных проблем и задач, связанных с трансформацией и цифровизацией систем энергетики, требующих применения современного математического аппарата для анализа состояний активных систем распределения электроэнергии в режиме онлайн.

Совместное заседание Секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС» и Секции по проблемам НТП в энергетике Научного совета РАН по системным исследованиям в энергетике **решило:**

1. Рекомендовать автору продолжить исследования в области математического моделирования и анализа режимов работы оборудования в активных системах распределения электроэнергии с целью разработки автоматизированной системы поддержки принятия решений для оперативно-технологического персонала электросетевых компаний при различных нарушениях работоспособности системы.

2. Рекомендовать автору разработать математические модели, учитывающие наличие в системе связанных, плавающих и двойных отказов электрооборудования, возникающих в активных системах распределения

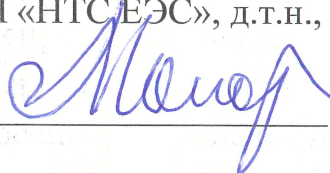


электроэнергии, включая определение наиболее уязвимого узла (ветви) для возможности принятия решений о проведении своевременного ремонта или замены оборудования.

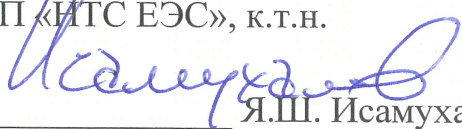
3. Рекомендовать главным энергетикам промышленных предприятий со сложными системами электроснабжения, имеющими в своем составе объекты РГ, и главным инженерам электросетевых компаний рассмотреть возможность применения математических моделей, методик расчета и предложений, изложенных в докладе, при разработке собственных автоматизированных систем поддержки принятия решений.

С заключительным словом выступил председатель секции «Активные системы распределения электроэнергии и распределенные энергетические ресурсы» НП «НТС ЕЭС», д.т.н. Илюшин П.В., в котором отметил, что рассмотренные на заседании вопросы математического моделирования систем энергетики в условиях трансформации энергосистем, интеграции в пассивные распределительные сети большого количества локальных интеллектуальных энергосистем (миниGRID) и объектов РГ является крайне актуальными. Обеспечить надежное и эффективное функционирование активных распределительных сетей, а также надежное электроснабжение потребителей возможно за счет использования современных систем поддержки принятия решений с целью исключения ошибок оперативно-технологического персонала.

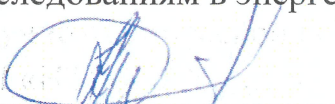
Первый заместитель Председателя  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор

  
В.В. Молодюк

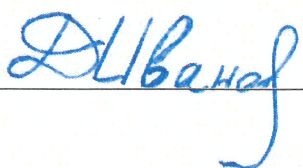
Ученый секретарь  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

  
Я.И. Исамухамедов

Председатель секции «АСРЭ и РЭР»  
НП «НТС ЕЭС», ученый секретарь  
Секции по проблемам НТП в энергетике  
Научного совета РАН по системным  
исследованиям в энергетике, д.т.н.

  
П.В. Илюшин

Ученый секретарь секции  
«Активные системы распределения  
электроэнергии и распределенные  
энергетические ресурсы» НП «НТС  
ЕЭС»

  
Д.А. Ивановский