



**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ:
ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ**

**СБОРНИК ТРУДОВ II ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ,
АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ**

ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ:
ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ**

**СБОРНИК ТРУДОВ II ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ,
АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ**

Челябинск

2018

УДК 62

ББК 31.2

С 56

Современные технологии в электроэнергетике и электротехнике: задачи, проблемы, решения: сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов / [науч. ред. А.Г. Савиновских]. – Челябинск: Южно-Уральский институт управления и экономики, Полиграф-Мастер – 71 с.

Агентство СІР Челябинской ОУНБ

Научный редактор – заведующий кафедрой «Транспорт и электроэнергетика» ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», кандидат технических наук, доцент, Савиновских А.Г.

Редактор-корректор – специалист редакционно-издательского отдела ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики» Фролова К.М.

В сборник включены статьи участников Всероссийской научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов, состоявшейся в г. Челябинске 12 декабря 2018 г.

ISBN 978-5-6040592-8-9

© ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики», 2018

© Коллектив авторов, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

М.М. Лукьянов, А.Г. Савиновских, И.А. Алексеев. Исследование надежности трансформаторов.....	4
М.М. Лукьянов, А.Г. Савиновских, М.А. Антонов. Исследование надежности трансформаторов. экспериментальная часть.....	11
В.М. Попов, В.Н. Левинский, В.А. Афонькина, А.Г. Савиновских, А.А. Щеголев. К вопросу сушки лекарственных трав для профилактики и лечения болезней крупнорогатого скота с применением электротехнологий.....	16
В.В. Селунский, А.Г. Савиновских, Б.Е. Шукшин, Д.С. Пайдушев. Модернизация схемы управления электростатической коптильной установки.....	21
В.В. Селунский, А.Г. Савиновских, В.И. Антони, В.И. Санников. Модернизация конструкции электростатической установки с целью снижения выбросов коптильного дыма.....	28
А.Г. Савиновских, Ю.П. Ильин, А.В. Белов, Н.Ю. Кузьмина, Н.В. Скородумова, Д.А. Новикова, Е.Р. Чупахин. Моделирование нестационарных теплофизических процессов метантенков БГУ в условиях переноса энергии.....	35
В.Е. Глазырин, Г.В. Глазырин, Н.А. Митрофанов. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных обмоток статора.....	47
С.Ю. Петухова, М.О. Рыжов. Алгоритм расчета токов короткого замыкания для выбора электрооборудования системы собственных нужд гидроэлектростанции при реконструкции.....	57
С.В. Болховитина. Перспективы развития PLM-системы в российской электроэнергетике.....	64
М.А. Иванова, А.А. Созонтов. Технологии аккумуляции электроэнергии на примере компании ALACAES.....	66

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

М.М. Лукьянов – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.Г. Савиновских – к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

И.А. Алексеев – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

Производственная деятельность электросетевых компаний связана с наличием рисков эксплуатационно-технологического характера, которые выражаются в нарушении нормального режима работы электрооборудования сетей, перебоями в электроснабжении, сверхнормативном увеличении нагрузок, возникновением аварий, и как следствие возникновением рисков появления опасных факторов производственной среды. Основными факторами данной группы рисков является высокая степень износа оборудования.

Одной из главных проблем электроэнергетики считается физический износ маслонаполненного высоковольтного электрооборудования, маслонаполненных силовых и измерительных трансформаторов. В целом, электробезопасность и надежность электроустановки с маслонаполненным высоковольтным электрооборудованием определяется качеством их изоляции. Сегодня в большинстве электроустановок используются силовые трансформаторы с маслобарьерной изоляцией, где твердая бумажная изоляция помещена в жидкий диэлектрик. Свойства этой главной изоляции в основном зависят от состояния жидкой изоляции, которая подвержена старению (износу) в условиях производственной эксплуатации в большей степени, чем бумажная.

Существующая ситуация

В изоляции большинства трансформаторов, применяемых для электроснабжения, используется трансформаторное масло, получаемое из нефти. Трансформаторное масло предназначено для изоляции находящихся под напряжением частей и узлов силового трансформатора, отвода тепла от нагреваемых при работе трансформатора частей, а также предохранения твердой изоляции от увлажнения. В соответствии с назначением, а также для длительной и безопасной работы маслонаполненного оборудования

трансформаторное масло должно обладать свойствами, которым соответствуют показатели качества, структурная схема взаимосвязи показана на рисунке 1.

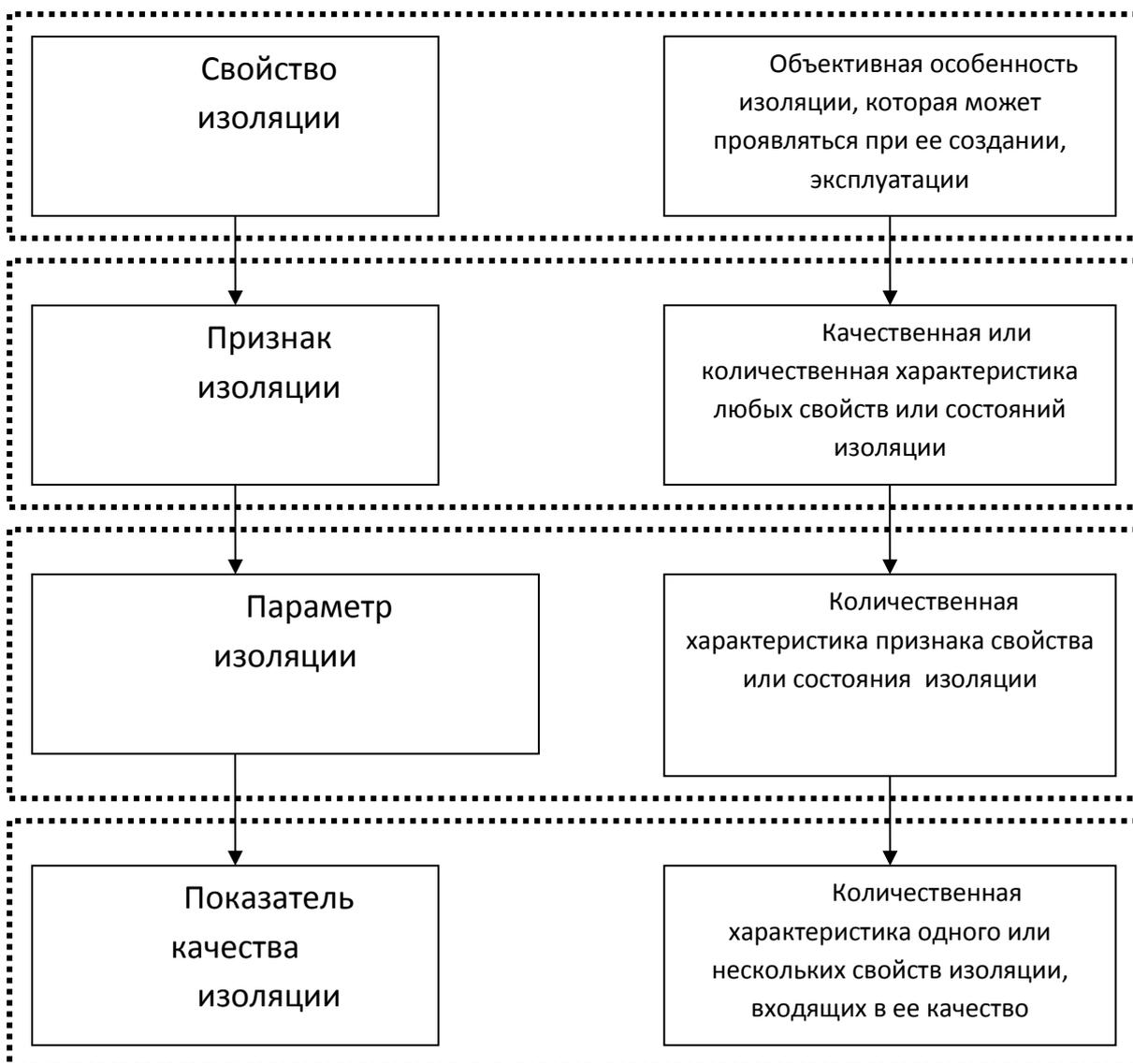


Рисунок 1. Структурная схема свойств и показателей качества изоляции

В соответствии с квалиметрическим подходом свойства жидкой изоляции описываются показателями качества, которые делятся на группы:

1) Показатели назначения – характеризуют те свойства, ради которых материалы и создаются, а именно конструкцию объекта, его техническое совершенство, состав, структуру.

2) Показатели надежности – характеризуют свойства объекта выполнять заданные функции, сохраняя свои показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени.

3) Показатели технологичности – характеризуют эффективность конструкторско-технологических решений для обеспечения высокой производительности труда при создании и восстановлении объекта.

4) Показатели транспортабельности – характеризуют приспособленность продукции к транспортированию без ее использования и потребления.

5) Эргономические показатели – характеризует общую степень удобства объекта.

6) Эстетические показатели – характеризуют художественность, выразительность и оригинальность формы объекта, соответствие формы среде и стилю, цветовое и декоративное решение, художественное решение упаковки.

7) Экономические показатели – себестоимость, рентабельность производства.

8) Показатели безопасности – характеризуют особенность продукции обеспечивать безопасность обслуживающего персонала при эксплуатации, хранении, транспортировании продукции.

В таблице 1 систематизирована и представлена номенклатура показателей качества трансформаторного масла.

Таблица 1 – Номенклатура показателей трансформаторного масла

Наименование показателя качества	Наименование характеризуемого свойства
1. Показатели назначения	
1.1.1 Электрическая прочность (пробивное напряжение), кВ	Изоляция
1.1.2 Тангенс угла диэлектрических потерь	Изоляция
1.1.3 Кинематическая вязкость, мм ² /с	Теплообмен, сопротивление внутреннему трению
1.2 Коррозионная способность масла	
1.2.1 Испытание коррозионного воздействия на пластинки меди	Антикоррозийное
1.3 Показатели прокачиваемости	
1.3.1 Температура застывания, °С	Изменение агрегатного состояния
1.3.2 Плотность, кг/м ³	Состав
2. Показатели надежности*	
2.1 Показатели долговечности	
2.1.1 Зольность, (% до наступления предельного состояния)	Склонность к отложениям
2.1.2 Водорастворимые кислоты и щелочи, (% до наступления предельного состояния)	То же
2.1.3 Массовая доля механических примесей, (% до наступления предельного состояния)	Загрязненность масла

2.1.4 Массовая доля воды, (% до наступления предельного состояния)	То же
2.2 Показатели очистки	
2.2.1 Газосодержание, (% до наступления восстановительных работ)	Старение
2.2.2 Кислотное число, (мг КОН на 1 г масла до наступления восстановительных работ)	То же
2.3 Стабильность против окисления, ч	Постоянство физико-химического состава
Наименование показателя качества	Наименование характеризуемого свойства
2.4 Средний срок сохраняемости	
3. Показатели технологичности	
3.1 Смешивание	Допустимость смешивания
4. Показатели транспортабельности	
4.1 Объем средств транспортирования и тары	Приспособлено к транспортированию, транспортируется партиями
5. Эргономические показатели	
5.1 Предельно-допустимая концентрация паров масла в воздухе, %	Воздействие на организм
5.2 Дозирование по весу	Возможность разливать в любую тару
6. Экономические показатели	
6.1 Лимитная цена, руб.	-
7. Показатели безопасности	
7.1 Температура вспышки, °С	Пожаро-, взрывоопасность
7.2 Температура самовоспламенения, °С	То же
7.3 Класс токсичности	Безопасность

Таким образом, трансформаторное масло обладает свойствами, которые позволяют ему выполнять функции диэлектрика и охлаждения основных узлов силового высоковольтного маслонаполненного электрооборудования.

Однако во время работы трансформатора его изоляция подвергается длительному воздействию электрического поля, высокой температуры и механическому воздействию.

В последнее время учеными выявлены и показаны новые механизмы износа изоляции в маслонаполненном электрооборудовании, связанные с кавитационным образованием микропузырьков.

Одной из главных причин изменения состояния изоляции вплоть до непригодной для предусмотренных условий эксплуатации сегодня считается кавитационный механизм износа (рис. 2)¹.

¹ Маргулис, М.А. Электрические явления в многопузырьковых кавитационных полях // Физическая химия. – 2007. – Т.81. – № 7. – С. 1334–1338.

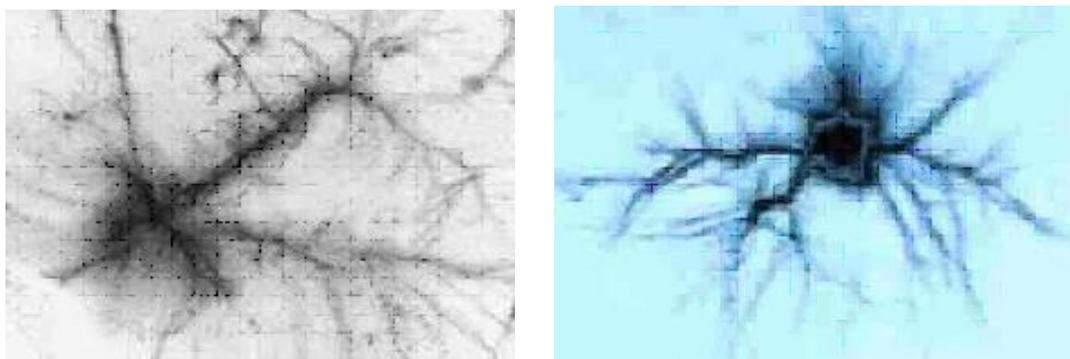


Рисунок 2. Зоны возникновения кавитационных пузырьков²

Кавитация в жидкости сопровождается различными явлениями³: характерным шумом, ускорением одних химических реакций и иницированием других, интенсивными микропотоками и ударными волнами, способными перемешивать слои жидкости и разрушать поверхности граничащих с кавитирующей жидкостью твердых тел и т. д. (рис. 3).



Рисунок 3. Захлопывание кавитационного пузырька

Однако наиболее важное явление с точки зрения безопасности эксплуатации главной изоляции, инициируемое кавитацией, является частичный разряд, электрический пробой и в конечном счете деградация всей изоляционной системы маслонаполненного высоковольтного электрооборудования.

На рисунке 4 представлен процесс развития разряда при наличии в жидкости газовых микровключений.

² Там же

³ Там же.

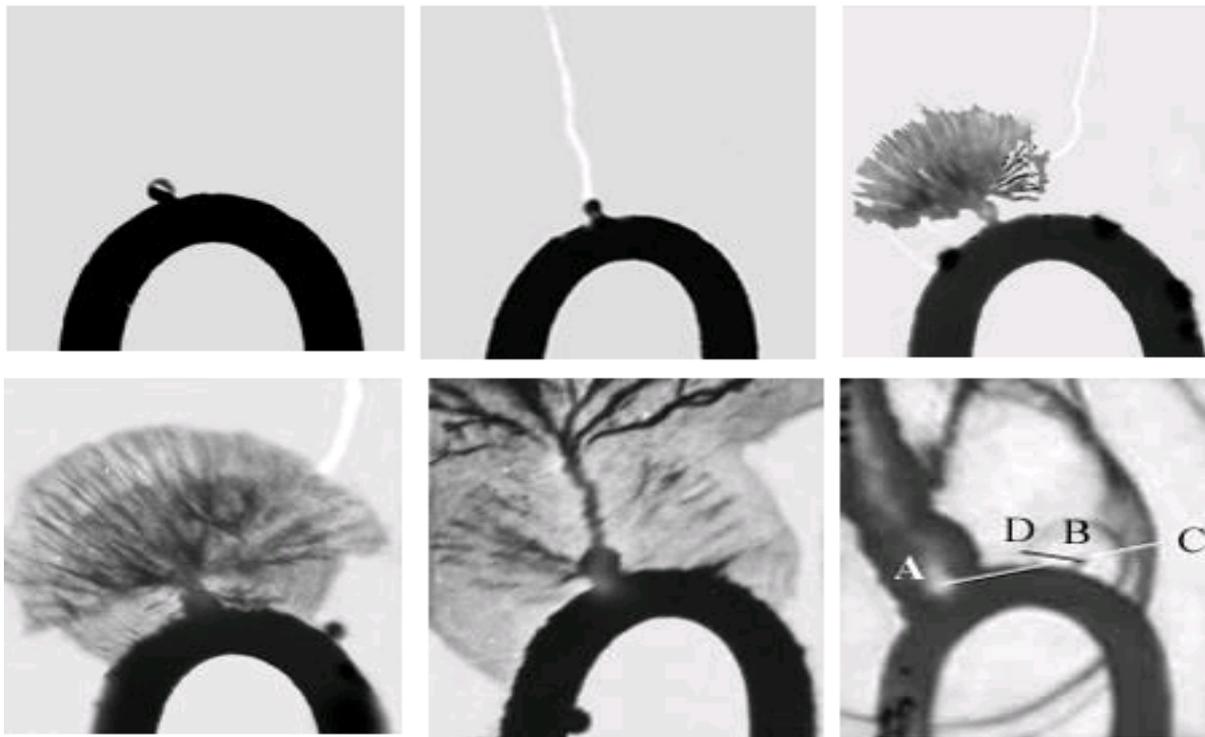


Рисунок 4. Процесс развития разряда при наличии в диэлектрической жидкости газовых микровключений⁴.

Зажигание разряда основано на возникновении многолавинового пробоя в пузырьке, деформации пузырька и последующего перехода разряда непосредственно в жидкую фазу после достижения в жидкости, вблизи полюса пузырька, критической напряженности. Зажигание разряда может происходить как на поверхности пузырька, так и при возникновении стримера внутри пузырька⁵.

Рост образовавшегося пузырька возможен в результате развития в нем ЧР и образования газообразных продуктов разложения изоляции. Увеличение газовых пузырьков сопровождается дальнейшим ростом интенсивности ЧР, что приводит, в конечном итоге, к пробоя изоляции.

Таким образом, одной из причин пробоя жидкой изоляции является пузырьковый механизм. При этом пузырьки газа могут изначально присутствовать в жидкости, либо возникать позднее в процессе эксплуатации. После образования пузырьков происходит их рост под действием

⁴ Коробейников, С.М. Электрофизические процессы в газообразных жидких и твердых диэлектриках. Процессы в жидкостях. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2010. 116 с

⁵ Там же.

электрического поля. Когда пузырьки достигают некоторого размера появляются условия для пробоя газа внутри них, т. е. возникновение электрического разряда определяется физико-химическим составом жидкости, параметрами парогазовой смеси, размерами пузырька при которых в определенных условиях в пузырьке (в парогазовой фазе) возникает электрический пробой.

Пробой газа в пузырьке приводит к локальному усилению электрического поля в жидкости. При определенных условиях становится возможным последующий пробой жидкого диэлектрика

В номенклатуре показателей качества признаков и параметров, прямо характеризующих дефектную область изоляции с микровключениями нет. Косвенно такую область можно обнаружить по изменению плотности трансформаторной жидкости, так как микровключения определенного размера, заполненные парогазовой смесью, будут иметь плотность отличную от жидкого диэлектрика. Однако это необходимый, но не достаточный признак для этого вида дефекта. Наиболее ценными с точки зрения практической применимости будут параметры, связывающие геометрические размеры микровключения и его пробивное напряжение, признаки, описывающие физико-механические свойства области диэлектрика с микровключениями и т. д.

Для описания новых признаков, характеризующих дефектную область изоляции с микровключениями и разработки новых показателей качества жидкой изоляции, характеризующих физико-механические свойства диэлектрика в действующем (работающем) высоковольтном электрооборудовании, необходимо в первую очередь провести исследования по определению геометрических параметров микропузырьков, возникающих в жидкой изоляции при определенных условиях производственной эксплуатации и по их распределению размеров.

Исследование физико-механических свойств МВВЭО, обнаружения новых ее свойств, для установления зависимостей с вредными и опасными факторами производственной среды и разработка на их основе новых методов и систем мониторинга и сигнализации об опасности обеспечат безопасные условия труда электротехнического персонала в электроустановках.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

М.М. Лукьянов – к.т.н., доцент, доцент кафедры «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.Г. Савиновских – к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

М.А. Антонов – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

Экспериментальные наблюдения производились с помощью оптико-телевизионной системы при увеличениях исследуемого образца трансформаторного масла с кратностью от 4 до 60. Непосредственное наблюдение за возникновением и развитием газовых микровключений позволило установить закономерности в распределении газовых микровключений.

Оптико-телевизионная система, представленная на рисунке 1 состоит из: исследуемого материала 1, устройства нагрева трансформаторного масла 2, блока осветителей 3, микроскопа 4, телекамеры 5, датчика температуры 6, компьютера 7 с блоком специализированных интерфейсов, калибровочного элемента 8.

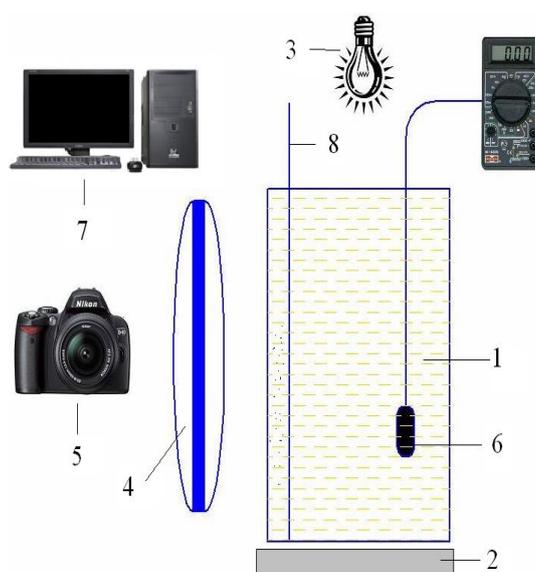


Рисунок 1. Оптико-телевизионная система наблюдения имитационного моделирования процессов тепловой кавитации

При работе системы исследуемый образец трансформаторного масла устанавливается в рабочую зону, блоком осветителей формируется требуемая подсветка материала. С помощью устройства нагрева регулируется величина теплового потока, от которого зависит скорость нагрева трансформаторного масла и процесс газообразования.

Оптическое изображение преобразуется телекамерой в телевизионное изображение и передается в компьютер для записи в блоке специализированных интерфейсов. В заключении проводится анализ полученного изображения и измерения газовых микровключений.

Исследованию подвергались образцы трансформаторного масла типа ГК влагосодержанием 5%, объем жидкой изоляции мгновенно фиксирующийся оптико-телевизионной системой составлял $4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

При проведении экспериментальных исследований температура окружающей среды составляла $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление 721 мм рт.ст.

В результате проведенного имитационного моделирования процессов тепловой кавитации установлено, что при малой скорости нагрева трансформаторного масла (не более 2°C в минуту) до 120°C образование газовых микровключений не зафиксировано при этом, постепенный прогрев масла, сопровождался его медленным перемещением за счет конвекции. Однако, в случае значительного увеличения скорости нагрева (более 6°C в минуту), движение жидкости происходит более интенсивно, возникает разделение слоев жидкого диэлектрика с разными температурами и в зонах локального перегрева под воздействием температуры и гидродинамической кавитации происходит образование газовых включений размерами от 1 до 500 мкм, т.е. пузырьчатое кипение масла. Газовые включения, зафиксированные во время проведения имитационного моделирования, представлены на рисунке 2.

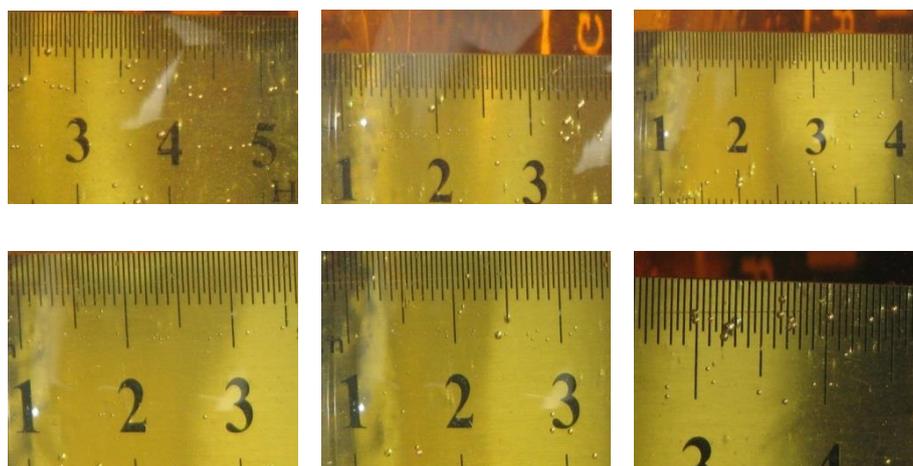


Рисунок 2. Газовые включения, зафиксированные во время проведения имитационного моделирования

В таблице 1 приведены значения температуры начала образования газовых микровключений в масле зафиксированные в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Таблица 1 – Начальные температуры образования газовых микровключений

Скорость нагрева, °С/мин	t, °С
1,75	не зафиксирована
6	65

Результаты имитационного моделирования экспериментальных исследований по определению количества и размеров газовых включений полученные путём наблюдений тепловой кавитации в жидкой изоляции представлены на рисунке 3 в виде зависимости количества микровключений от их размеров.



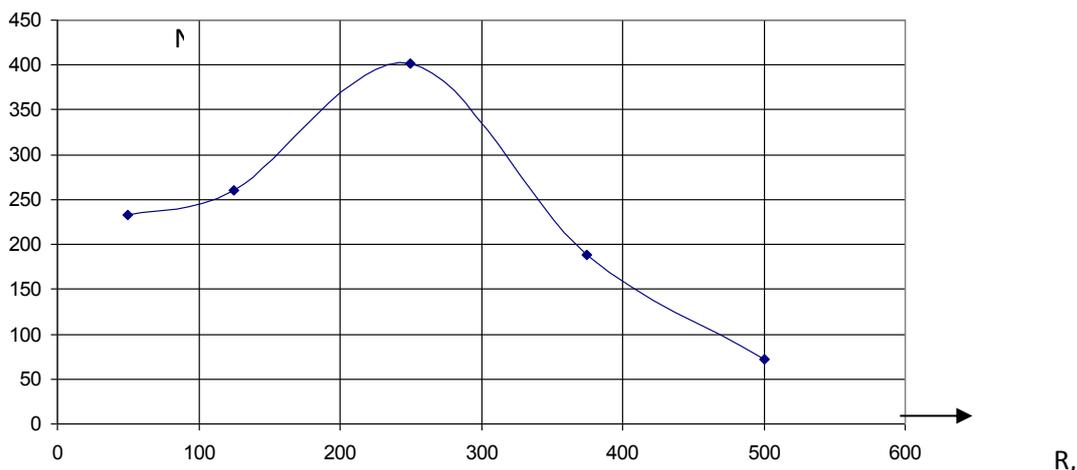


Рисунок 3. Зависимость количества микровключений от их размеров при тепловом механизме кавитации

В результате обработки измерений установлены закономерности в распределении газовых микровключений в жидкой изоляции.

Получена аналитическая функция распределения плотности вероятности среднего радиуса газовых включений в жидкой изоляции при тепловом механизме кавитации имеет вид:

$$f_{\text{exp}}(R) = \frac{1}{384.005} \cdot e^{-\frac{(R-214093)^2}{306.392}} \quad (1)$$

R – радиус микропузырька, мм.

В графическом виде функция распределения плотности вероятности среднего радиуса газовых включений в жидкой изоляции представлена на рисунке 4.

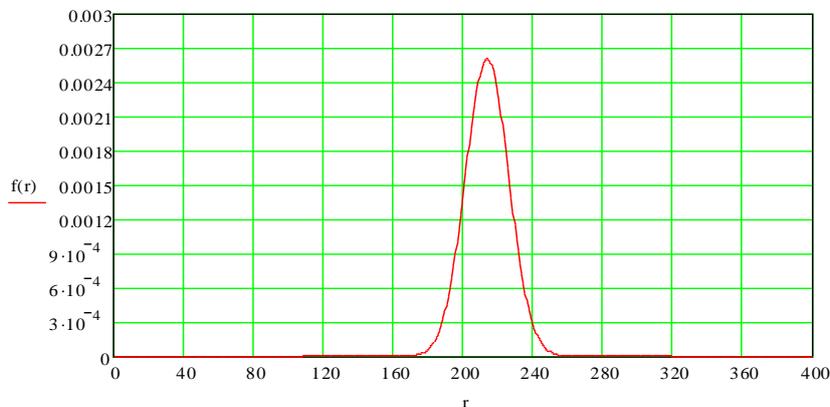


Рисунок 4. Распределение плотности вероятности среднего радиуса газовых включений в жидкой изоляции при тепловом механизме кавитации

В результате обработки данных получена аналитическая функция распределения газовых микровключений в жидкой изоляции по размерам при тепловом механизме кавитации, которая имеет вид:

$$f(R) = \frac{1}{123.252 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(R-165,721)^2}{2 \cdot 123,252^2}} \quad (2)$$

Обсуждение результатов

Таким образом, в процессе тепловой кавитации установлена закономерность в распределении газовых микровключений в трансформаторном масле ГК, при объемном газосодержании $1,9 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$. Аналитическая функция распределения газовых микровключений в жидкой изоляции по размерам подчиняется нормальному закону, с максимальной концентрацией пузырьков радиусом 165 мкм. Такие микропузырьки являются центрами зарождения частичных разрядов в жидкой изоляции и меняют ее свойства, что часто приводит к пробое диэлектрика и как следствие к отказу высоковольтного электрооборудования. Для контроля процессов образования микровключений необходимо разработать структурно – чувствительный параметр показателя качества жидкой изоляции, отражающего физико-механические свойства диэлектрика с микровключениям.

К ВОПРОСУ СУШКИ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ТРАВ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ БОЛЕЗНЕЙ КРУПНОРОГАТОГО СКОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

В.М. Попов – д.т.н., ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

В.Н. Левинский – лаборант, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

В.А. Афонькина – к.т.н., доцент кафедры «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.Г. Савиновских – зав. кафедрой «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.А. Щеголев – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

В статье рассмотрена актуальность сушки лекарственных трав для профилактики и лечения болезней крупнорогатого скота на животноводческих комплексах. Рассмотрены основные этапы заготовки лекарственных трав, из которых выделяется этап сушки, как наиболее важный и проблематичный. Предложены пути решения основных проблем сушки с применением электротехнологий.

Современные тенденции профилактики и лечение болезней крупного рогатого скота, на животноводческих комплексах фермерских хозяйств и агрохолдингов, достигли высочайшего уровня медикаментозной терапии. Однако применения многолетних наработок лечения и профилактики болезней животных с применением лекарственных трав для животноводческих комплексов еще во времена Советского союза (СССР) весьма актуально и перспективно в наше время. Во время существования колхозов и совхозов, заготовкой лекарственных трав было обязательной процедурой для любого хозяйства, кроме того, существовали специализированные хозяйства по выращиванию эфирномасличные и лекарственные культуры, к примеру совхоз «Радуга», создан в военном 1944 г., как специализированное хозяйство выращивания лекарственных трав, на протяжении 74 лет производит лекарственно-растительное сырье, оставаясь и ныне лидером лекарственного

производства Украины. Совхоз «Большое Можейко» в Беларуси один из лидеров по сбору и заготовке корня валерьяны и лекарственной ромашки¹. Для нашего региона Челябинской области основными травами для заготовки были и остаются: цветы ромашки, крапива, чемерица, полынь горькая, тысячелистник обыкновенный, основные характеристики представлены в таблице.

Таблица 1 – основные характеристики лекарственных трав

№ п/п	Наименование	Срок хранения	Лечебные свойства
11	Цветы ромашки	2	Способность ромашки задерживать брожение в кишечнике, улучшать движение пищевых масс и нормализовать отделение газов. Ее используют как антиспазматическое, противобродильное и противовоспалительное средство.
22	Крапива	2	Листья крапивы применяют как кровоостанавливающее средство при кровотечениях из матки и при внутренних кровоизлияниях.
3 3	Чемерица	3	Водные отвары и порошок корневища используют для обработки животных против вшей, власоедов, блох и клещей.
4 4	Полынь горькая	2	Полынь успешно используют при вялом пищеварении, воспалении желудка, скоплениях газа в кишечнике и некоторых болезнях печени.
5 5	Тысячелетник обыкновенный	2	Тысячелистник применяют как ранозаживляющее и кровоостанавливающее средство. Растение обладает выраженным горьким вкусом. Назначают внутрь для улучшения пищеварения и возбуждения аппетита.

Заготовка лекарственных трав производится в 5 этапов: сбор, подготовительные операции, сушка, упаковка и хранение.

Для сбора привлекаются индивидуальные сборщики и бригады, для которых производят все необходимые инструктажи, наименование трав, время сбора и место сбора. В подготовительные операции входит: сортировка, удаление ненужных примесей, а также мойка по необходимости. Для сохранения заготовленного сырья необходима его своевременная и качественная сушка.

¹ Войтюк М.М., Дроздов И.И., Обыденников В.И. Заготовка и производство лекарственных растений в крестьянских (фермерских) и личных подсобных хозяйствах. Практик. Рекомендации по перспективным технологиям организации альтернативной занятости сельского населения. – Библиотека сельского специалиста. – Вып. 2 –М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – С.76

Упаковка и хранения производят в специально отведенных хорошо проветриваемых помещениях.

Сушку лекарственного сырья, как правило, осуществляли естественным способом. В хорошую погоду на открытом воздухе, но не под прямыми солнечными лучами, так как они разрушают биологически активные вещества, поэтому сушили на чердаках, проветриваемых сараях, дополнительно оборудовали помещения стеллажами. Достаточно трудоемкий процесс, с учетом того что существовала необходимость постоянного перемешивания, перекалывания сырья и определенных навыков персонала, для определения готовности лекарственного сырья к упаковке, к закладке на хранения, а также оценки качественных показателей. То есть как таковых отработанных режимов сушки не существовало, все действия естественной сушки трав, производились «на глаз» при благоприятных условиях погоды, при этом необходимо понимать то, что разные по химическому составу лекарственные травы следует и сушить по-разному, к примеру травы, содержащие эфирные масла необходимо сушить при температуре 25-30°C, алколоидно- и гликозидосодержащие при температуре 50-60°C, витаминные 40-45°C. При естественной сушке, соблюсти необходимые параметры не возможно, но возможно это сделать в искусственных специализированных сушильных установках.

Наибольшее распространение сушки лекарственных трав получили сушильные установки конвективного типа, главное преимущество которых состоит в конструктивной простоте и в работе от разных источников энергии. Однако они имеют ряд недостатков: потери тепла с отходящим отработанным воздухом, низкое качество конечного продукта из-за воздействия на продукт горячего воздуха. Указанные недостатки конвекционной сушки объясняется спецификой взаимодействия горячего воздуха с высушиваемым сырьем в различные этапы процесса сушки. На начальном этапе сушки взаимодействие протекает достаточно эффективно, при высокой скорости сушки, энергоёмкость процесса мала. По мере высыхания продукта и связанного с этим снижения его тепло- и массо-проводящих характеристик, всё большая доля тепловой энергии не расходуется эффективно. Энергоёмкость процесса возрастает, время сушки многократно увеличивается, возникают локальные перегревы продукта, что в первую очередь отражается на качестве готовой продукции. При пониженных температурах конвективной сушки трав снижается сушильный потенциал

процесса, увеличивается продолжительность, соответственно снижается производительность сушильного установок².

Схожие проблемы возникают при использовании менее распространенных, но имеющих подобные недостатки технологий сушки в псевдокипящем слое и других, основанных (как и конвекционная сушка) на поверхностном обогреве высушиваемого сырья³.

Все вышеизложенные недостатки указывают на необходимость применения для сушки лекарственных трав совершенного иного воздействия на высушиваемое сырье. В данном случае весьма перспективно применение инфракрасной сушки, принцип которой значительно отличается от классических методов нагрева: 1) не требуется наличия теплоносителя, способствующего загрязнению обрабатываемого материала; 2) материал не перегревается вблизи теплопередающей стенки, тепловыделение происходит в объеме материала, и его температура выше, чем температура стенок аппарата; 3) интенсивность нагрева не зависит от агрегатного состояния материала, а только от его оптических, диэлектрических свойств⁴. При использовании инфракрасного нагрева интенсивность сушки увеличивается в 1,5-2,0 раза при снижении энергетических затрат в 1,5 раза⁵.

В качестве генератора инфракрасного излучения для сушки лекарственных трав следует выбирать инфракрасный пленочный электронагреватель (рис 1.), так как они способны создавать высокую плотность потока энергии (от 34 до 80 Вт/м²) в диапазоне длин волн от 8 до 9,5 мкм⁶.

² Зудин, Е.С., Попов, В.М., Афонькина, В.А. К вопросу об инфракрасной сушке макаронных изделий. Актуальные проблемы энергетики АПК. Материалы VIII международной научно-практической конференции. – Саратов.: Издательство ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2017. С. 89-92

³ Попов, В.М., Афонькина, В.А., Левинский, В.Н. К вопросу об инфракрасной сушке томатов. Материалы Пятьдесят пятой международной научно-технической конференции «Достижение науки – агропромышленному производству». – Челябинск.: Издательство ФГБОУ ВО «Южно-Уральский ГАУ», 2016. С. 267–274.

⁴ Левинский, В.Н., Попов, В.М., Афонькина, В.А. Разработка сушильной установки высоковлажного биологического сырья с применением пленочных электронагревателей. Материалы научно-практической конференции в рамках XXVI международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2016» Часть III. Уфа – 2016. С.34–39.

⁵ Попов, В.М., Афонькина, В.А., Левинский, В.Н. Применение инфракрасного пленочного электронагревателя в конструкции сушильных установок прессованного чая. Актуальные вопросы агроинженерных наук: теория и практика. Материалы национальной научной конференции Института агроинженерии. – Троицк. : Издательство Южно-Уральский государственный аграрный университет, 2018. С. 284-290.

⁶ Попов, В.М., Афонькина, В.А., Шукшина, Е.И., Левинский, В.Н., Майров, В.И. Патент 2596918 F26B 9/06 «Установка для сушки высоковлажных материалов» - №2015779853/06, заявленный 26.05.2015, опубликованный 10.09.2016. Бюл. №25.

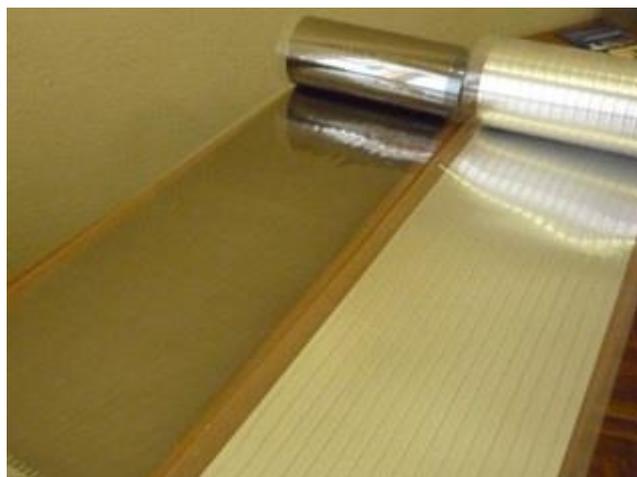


Рисунок 1. Инфракрасный пленочный электронагреватель

Таким образом, применение пленочных электронагревателей в сушильных установках для сушки лекарственных трав с целью профилактики и лечения болезней крупнорогатого скота, будет способствовать: 1) получению высокого качества конечного продукта за счет выдержки необходимых температурных диапазонов сушки, отсутствия локальных перегревов сырья, отсутствия погодных и суточных условий сушки; 2) снижение трудоемкости за счет уменьшения операции ручного труда, сокращение обслуживающего персонала процесса сушки и за счет возможности автоматизации технологического процесса сушки лекарственных трав; 3) снижение энергоемкости процесса за счет четкого понимания и возможности контроля количества выдаваемой мощности инфракрасными пленочными электронагревателями на объект сушки, отсутствия инерционности процесса.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ КОПТИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В.В. Селунский – к.т.н., доцент кафедры транспорта и электроэнергетики, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.Г. Савиновских – к.т.н., заведующий кафедрой транспорта и электроэнергетики, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Б. Е. Шукшин – старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Д.С. Пайдушев – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

В статье дается анализ существующих способов копчения пищевых продуктов. Приводятся характеристики рыбных продуктов, приготовленных способами горячего и холодного копчения. Обосновывается технология электрокопчения. Приводятся результаты работы установки электростатического копчения УЭК-1 «Идилия», показаны её недостатки. Представлен вариант модернизации схемы управления электростатической установкой, позволяющий эксплуатировать установку в автоматическом режиме. Представлены результаты испытаний модернизированной установки.

При производстве копченых рыбных продуктов применяют горячее, полугорячее и холодное копчение¹. Горячее копчение производится при температуре коптильной среды выше +80 °С (+80...+170 °С)². Коптильная среда – это либо дымо-воздушная смесь, при традиционном дымовом копчении, либо взвесь распыленного коптильного препарата, при «мокром» копчении. Полугорячее копчение производится в диапазоне температур от +40 °С до +80 °С. Этот способ копчения в России в настоящее время не применяется, в том числе из-за отсутствия соответствующих ГОСТов на готовый продукт. Холодное копчение проводится при температуре коптильной среды ниже +40 °С³.

¹ Воскресенский Н.А., Логунов Л.Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. – 424 с.

² Мезенова, О.Я., Ким, И.Н., Бредихин, С.А. Производство копченых пищевых продуктов. – М.: Колос, 2001. – 208 с.

³ Там же.

Процесс горячего копчения производится быстро, в течение не более 2 часов. Мясо рыбы при таком способе копчения полностью проваривается, имеет нежную и сочную консистенцию, содержит большое количество влаги. Эти продукты не могут в обычных условиях храниться длительное время, поэтому их охлаждают и реализуют в течение не более трех суток с момента изготовления.

Рыба холодного копчения, в отличие от продуктов горячего копчения, имеет значительно большую соленость и меньшую влажность. Процесс холодного копчения продолжается длительное время, но и хранится рыба, приготовленная таким способом, значительно дольше⁴. Сравнительные характеристики рыбы, приготовленной способами горячего и холодного копчения, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика продуктов горячего и холодного копчения.

Показатели	Копчение	
	горячим способом	холодным способом
Сырье или полуфабрикат	Свежее и мороженое	Соленое
Температура дыма при копчении, °С	80...170	Не выше 40
Продолжительность копчения, сутки	До 0,1	До 5
Содержание соли, %	1,5...3,0	5...12
Содержание воды, %	60...70	48...58 (сельдь до 60)
Консистенция мяса рыбы	Сочная, нежная	Плотная, у некоторых рыб (например, у сельди) нежная

Недостатком холодного копчения, кроме значительной длительности процесса, является большой расход дымообразующего сырья (опилок, стружек). Полезное использование дыма при холодном копчении составляет всего 3...4 %. Остальной дым выбрасывается за пределы коптильной камеры и загрязняет окружающую среду. Поэтому в настоящее время коптильное производство запрещается размещать в пределах населенных пунктов.

Значительно сокращается время приготовления рыбопродуктов при использовании технологии электростатического копчения. Такая технология заключается в том, что коптильный дым, который подается в коптильную камеру, заряжается в поле коронного разряда и ускоренно осаждается на продукт, имеющий противоположный потенциал. При этом процесс насыщения

⁴ Там же.

продукта коптильными веществами значительно ускоряется. Кроме этого полезно используется (оседает на продукт) до 93...95 % коптильного дыма⁵.

Отечественной промышленностью выпускаются установки электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия», «Ижица-1200», «Ижица-1200М2» и другие⁶. Нами была испытана установка электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия», выпускаемая Северодвинским заводом «Полярная звезда»⁷. Установка изображена на рисунке 1.



Рисунок 1. Установка электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия»

На данной установке производилось копчение мойвы и скумбрии электростатическим способом. В результате были получены продукты хорошего качества, удовлетворяющие требованиям ГОСТ к пищевым продуктам⁸. Время холодного копчения мойвы на установке электростатического копчения составило 6 минут, скумбрии – 25 минут. При этом поверхность рыбы полностью

⁵ Селунский, В.В. Модернизация электростатической коптильной установки // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2005. – № 8. – С. 22–24.

⁶ Мезенова, О.Я., Ким, И.Н., Бредихин, С.А. Производство копченых пищевых продуктов. – М.: Колос, 2001. 208 с.

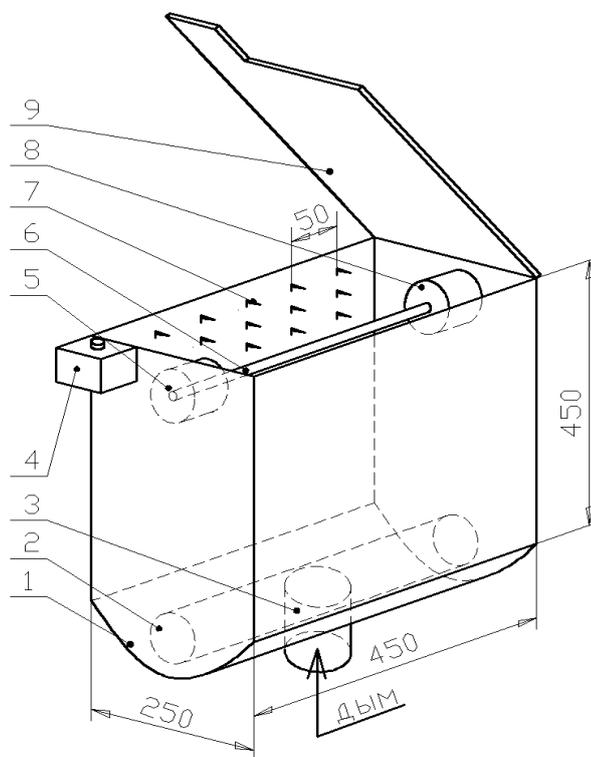
⁷ Устройство электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия». Руководство по эксплуатации – Северодвинск, 2013. 64 с.

⁸ Рыба и рыбные продукты. Рыба копченая, вяленая и сушеная // Государственные стандарты. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. 154 с.

покрывалась коптильными веществами. Однако рыба при этом ещё не была готова к употреблению.

Для полной готовности продукта необходимо произвести его выдержку в течение 2..3 суток при невысокой температуре (10...15 °С). При этом коптильные вещества проникают внутрь, равномерно распределяются, происходят автолитические процессы, то есть происходит полное созревание рыбы⁹.

Однако опытная эксплуатация УЭК-1 «Идиллия» выявила недостатки в работе этой установки. Дело в том, что при постоянно включенном источнике высокого напряжения рыба, находящаяся в коптильной камере, прокапчивается неравномерно. Большая часть коптильного препарата оседает на тех частях рыбы, которые располагаются в нижней части коптильной камеры, ближе к дымогенератору, откуда подается коптильный дым (см. рис. 2).



1 – коптильная камера; труба для распределения коптильного дыма; 3 – труба для подачи дыма от дымогенератора; 4 – конечный выключатель; 5, 8 – высоковольтные изоляторы; 6 – рабочий электрод; 7 – каронирующие электроды; 9 – верхняя прозрачная крышка.

Рисунок 2. Схема установки электростатического копчения

⁹ Селунский, В.В., Чуринов, В.Ю. Повышение эффективности установки электростатического копчения // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 1. – С. 182 – 187.

Для обеспечения равномерности прокапчивания рыбы источник высокого напряжения должен работать не постоянно, а включаться периодически, после полного заполнения коптильной камеры дымом и выравнивания его концентрации. При проведении опытного копчения рыбы с периодическим включением источника высокого напряжения заполнение коптильной камеры дымом определялось визуально, через прозрачную верхнюю крышку. В результате был получен график подачи высокого напряжения на электроды электростатической установки УЭК-1 «Идиллия» при копчении мойвы. Начало графика совмещено с началом поступления коптильного дыма в коптильную камеру. Большим недостатком УЭК-1 «Идиллия» является то, что между моментом включения установки в сеть и началом появления коптильного дыма проходит довольно много времени, порядка 7...8 минут. Решить данную проблему возможно при использовании выносного дымогенератора¹⁰.

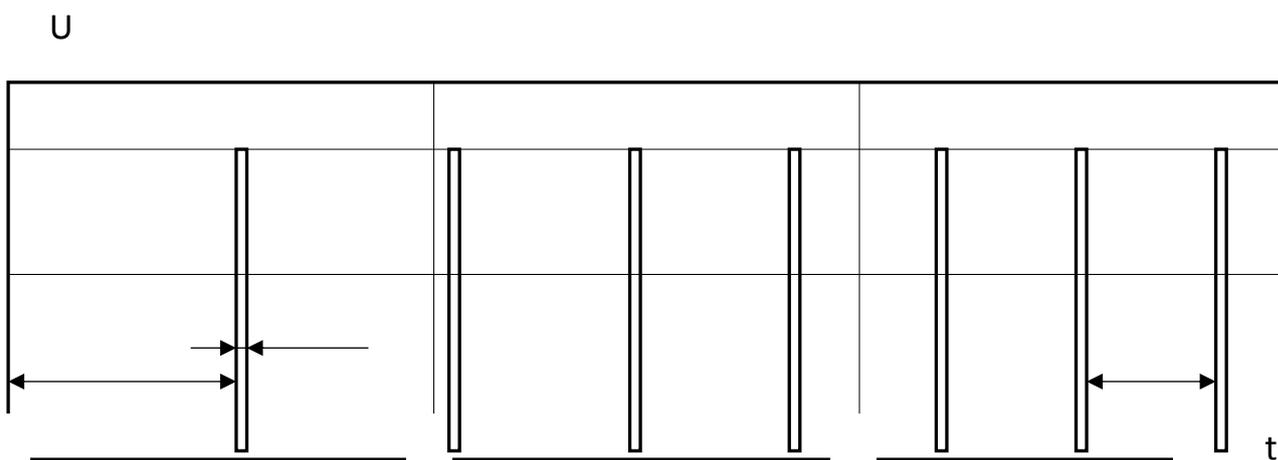


Рисунок 3. График работы электростатической установки при копчении мойвы (один цикл копчения)

Как видно из графика, общая продолжительность копчения мойвы составила 5,7 минуты (342 секунды). Продолжительность пауз (время в течение которого камера наполняется дымом) различна. В начале процесса копчения пауза составляла 64 секунды, в конце процесса копчения – 40 секунд.

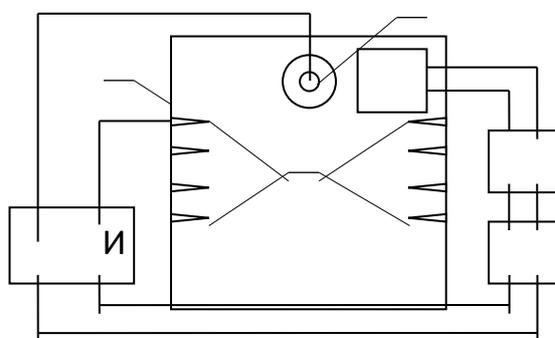
Объясняется это тем, что в процессе копчения происходит постепенный разогрев дымообразующего сырья и увеличение мощности дымогенератора. Продолжительность подачи высокого напряжения составила 3 секунды. При

¹⁰ Буторин, В.А, Селунский, В.В., Банин, Р.В., Ябыков, К.Ж. Оптимизация электростатического способа копчения рыбы // АПК России. – 2018. – Том 25. – № 1. – С. 89 – 96.

этом коптильная камера полностью очищалась от дыма, который оседал на поверхность продукта.

При копчении мойвы производилось ручное включение источника высокого напряжения. Реализовать представленный на рисунке график работы электростатической установки в автоматическом режиме можно либо путем использования программного реле, либо путем контроля заполнения дымом коптильной камеры. Первый способ более простой, но имеет тот недостаток, что вид графика (рисунок 3), то есть продолжительность пауз будет зависеть от производительности дымогенератора, которая в свою очередь будет определяться множеством случайных величин: видом дымообразующего сырья, его влажностью, степенью измельчения, заполнением дымогенератора, температурой окружающего воздуха и др.

Поэтому нами предлагается модернизировать схему управления электрокоптильной установкой путем перевода её в автоматический режим работы. Структурная схема устройства показана на рисунке 4. Предлагается оснастить коптильную камеру фотореле, которое устанавливается в верхней части коптильной камеры и вырабатывает сигнал включения при заполнении камеры дымом.



1 – положительный электрод; 2 – коптильная камера; 3 – отрицательный коронирующий электрод; ИВН – источник высокого напряжения; Ф – фотореле; У – усилитель; К – коммутационный аппарат

Рисунок 4. Схема управления электростатической коптильной установки

Схема работает следующим образом: после заполнения коптильной камеры дымом фотореле **Ф** вырабатывает сигнал, который подается на усилитель **У**, а затем на коммутационный аппарат **К**. Коммутационный аппарат

подключает к сети источник высокого напряжения **ИВН**. Последний включается и в течение 3 секунд подает высокое напряжение на положительный (рабочий) электрод и на систему коронирующих электродов 3. Схема была опробована на копчении мойвы и показала свою работоспособность.

Выводы

1. Обоснована модернизация схемы управления установки электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия», позволяющая перевести её в автоматический режим работы.

2. Представлены результаты испытаний модернизированной установки при производстве мойвы холодного копчения.

3. Приведена модернизированная схема управления электростатической установкой.

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ КОПТИЛЬНОГО ДЫМА

В.В. Селунский – к.т.н., доцент кафедры транспорта и электроэнергетики, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.Г. Савиновских – к.т.н., заведующий кафедрой транспорта и электроэнергетики, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

В.И. Антони – доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

В.И. Санников – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

В работе показана классификация всех дымогенераторов. Описан механизм и способы производства коптильного дыма, его состав и сырье для производства. Обоснована целесообразность использования при производстве рыбопродуктов технологии электростатического копчения. Дан анализ существующих электростатических установок, показаны их недостатки. Предлагается модернизировать установку электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия» путем использования выносного дымогенератора тления. Кроме того, предлагается установить коронирующие электроды на верхней крышке коптильной камеры, что позволит значительно снизить выбросы коптильного дыма и повысить равномерность обработки поверхности продукта коптильными веществами.

Для получения коптильного дыма используются дымогенераторы (устройства для производства дыма) различных типов:

1. Дымогенераторы тления:

а) с саморазогревом;

в) с внешним подогревом (электрическим, газовым, на жидких и твердых топливах)

2. Фрикционные дымогенераторы трения (дисковые и барабанные).

3. Паровые дымогенераторы.

Применение дымогенераторов позволяет снизить содержание вредных канцерогенных веществ в копченых продуктах в 10...30 раз по сравнению с

продукцией, приготовленной в камерных коптильных печах старого типа (в одной камере получают дым и там же коптят)¹.

В паровых дымогенераторах образование дыма происходит при пиролизе опилок в струе перегретого пара при температуре 300 – 400 °С². Паровые дымогенераторы применяют редко из-за сложности конструкции, а также из-за того, что дым получается «мокрым», в результате чего его невозможно применять при холодном копчении. Преимуществом паровых дымогенераторов является то, что дым получается практически без вредных веществ (за счёт оптимальной температуры пиролиза).

При сравнении первых двух дымогенераторов (дымогенераторов тления и фрикционных) у каждого выявлены достоинства и недостатки.

Достоинства фрикционных дымогенераторов:

1. Высокий коэффициент готовности.
2. Возможность полной автоматизации.
3. Лёгкость регулировки дымообразования.

Недостатки:

1. Высокий уровень шума.
2. Дополнительный расход электроэнергии для привода рабочего органа.
3. Специфичность ароматических свойств дыма, так как пиролиз протекает нетрадиционным путём.

В настоящее время для производства продуктов холодного копчения в основном применяется естественное дымовое копчение. Недостаток этого способа заключается в длительности процесса, продолжительность которого может достигать, для некоторых рыбных продуктов, нескольких суток. Кроме того полезное использование дыма при таком виде копчения составляет всего порядка 4...5 %³.

Задача более эффективного использования коптильного дыма и ускорения процесса осаждения частиц на поверхность копчения решается при применении электрического поля высокого напряжения. На этом принципе основан способ электростатического копчения.

¹ Воскресенский, Н.А., Логунов, Л.Л. Технология рыбных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. 424 с.

² Абдрафиков, С.Н., Селунский, В.В. Производство рыбопродуктов. – Челябинск: ЧГАУ, 2002. 280 с.

³ Буторин, В.А., Селунский, В.В., Банин, Р.В., Ябыков, К.Ж. Оптимизация электростатического способа копчения рыбы // АПК России. – 2018. – Том 25. – № 1. – С. 92.

Важным преимуществом электростатического копчения является ускорение процесса осаждения и насыщения поверхности продукта коптильными веществами. При использовании этой технологии более полно используется, по сравнению с обычным копчением, коптильный дым. При электростатическом копчении на поверхность продукта осаждается порядка 95...86% всего вырабатываемого дыма⁴.

В процессе электростатического копчения рыба приобретает окраску, характерную для копченого продукта. Однако из-за скорости процесса продукт не успевает обезводиться и пропитаться коптильными веществами. Продукция получается излишне сырой и требует дополнительной обработки. Поэтому электростатическое копчение необходимо совмещать с дополнительным пропеканием для горячего способа производства рыбных продуктов и сушкой для холодного способа.

Технологический процесс электростатического копчения осуществляется следующим образом: коптильный дым пропускается через коронирующие электроды (электроды специальной конструкции, на которые подается высокое напряжение величиной 20 - 30 тыс. вольт при этом образуется коронный разряд). В результате частицы дыма, попадая в зону коронного разряда, ионизируются и получают электрический заряд. Под влиянием электрического поля заряженные частицы дыма в электрическом поле приобретают направленное движение и с большой скоростью осаждаются на поверхности продукта, имеющего противоположный заряд⁵.

Электрокопчение значительно ускоряет процесс дымовой обработки продукта и позволяет получать большие количества копченого полуфабриката. К недостатку электрокопчения можно отнести то, что продукт после окончания дымовой обработки требует дополнительной выдержки при определенной температуре и влажности, во время которой происходит его дозревание и удаление лишней влаги. Дозревание обработанного коптильными веществами полуфабриката и доведение его кондиций до требований ГОСТ целесообразно осуществлять в специальных камерах или оборудованных помещениях с необходимым температурно-влажностным режимом.

⁴ Буторин, В.А, Селунский, В.В., Банин, Р.В., Ябыков, К.Ж. Оптимизация электростатического способа копчения рыбы // АПК России. – 2018. – Том 25. – № 1. – С. 92.

⁵ Верещагин, И.П. Коронный разряд в аппаратах ЭИТ. – М.: Энергоатомиздат, 1985. 159 с.

Отечественной промышленностью выпускаются установки электростатического копчения: УЭК-1 «Идилия» (рассчитанная на разовую загрузку продукта, равную 4 кг), ЭКМ – 50 (разовая загрузка за один цикл копчения 50-60 кг), ЭКМ – 150 (125-150 кг), ЭКМ – 300 (250-350 кг), «ИЖИЦА – 1200» (вместимость коптильного шкафа 1,2 м³)⁶.

Установка УЭК-1 «ИДИЛЛИЯ» позволяет получать, при соблюдении технологии копчения, высококачественные продукты. Однако она не лишена некоторых недостатков. Во-первых, при копчении трудно контролировать и регулировать температуру дыма. Это происходит из-за того, что в серийной конструкции дымогенератор находится непосредственно под коптильной камерой и температура дыма часто превышает допустимую, необходимую для холодного копчения (меньше +40 °С). Во-вторых, при работе установки происходит выделение коптильного дыма через щели между корпусом и верхней крышкой. Если же обеспечить герметичность её закрытия, то отсутствие естественной «тяги» (выделения воздуха через верхние щели) приведет к медленному наполнению дымом коптильной камеры и затягиванию процесса копчения.

Для решения первой проблемы нами был разработан и изготовлен выносной дымогенератор тления с косвенным подогревом (рис. 1)⁷. Его корпус прямоугольной формы (1) сварен из металла толщиной 3 мм. С одной стороны, к корпусу приварены уголки (2) и (3), в которых закреплена заслонка (4). Она закрывает вход дымогенератора и служит для загрузки дымообразующего сырья (опилок) и регулирования подачи воздуха в зону тления. Противоположная сторона корпуса дымогенератора закрыта, а в верхней части вварена труба диаметром 60 мм для отвода дыма (5). Нагрев корпуса производится снизу с помощью паяльной лампы, газовой горелки или другим способом. В нашем случае нагрев производился с помощью электрической плитки.

⁶ Okopchenii.ru [Электронный ресурс]. – URL: <http://okopchenii.ru/svoimi-rukami/elektrostaticheskaya-koptilnya.html>; Домашнее копчение [Электронный ресурс]. – URL: <http://domkopchenie.ru/kak-sdelat/elektrostaticheskaya-koptilnya.html>; Электростатическое копчение в рыбных консервах [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.activestudy.info/elektrostaticheskoe-kopchenie-v-rybnykh-konservax/>

⁷ Селунский, В.В., Чурин, В.Ю. Повышение эффективности установки электростатического копчения // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 1. – С. 182–187.

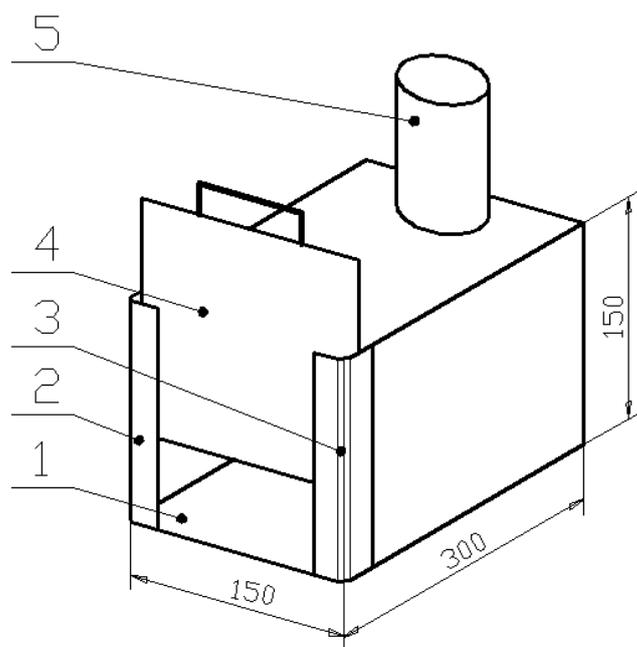


Рисунок 1. Конструкция дымогенератора
(обозначения в тексте)

Дым от дымогенератора в коптильную камеру подается по металлической трубе (диаметром 60 мм), от длины которой зависит температура в области копчения. Способы соединения дымогенератора с установкой УЭК-1 «Идиллия» изображены на рисунке 2. При длине трубы равной 1500 – 2000 мм и более (рисунок 2а), температура дыма в коптильной камере не превышает +40 °С, при этом происходит холодное копчение продукта. В том случае, когда дымогенератор располагается в непосредственной близости от коптильной камеры (рисунок 2б), температура дыма в ней становится выше +40 °С, что соответствует полугорячему или горячему копчению⁸. Интенсивность дымообразования и густота дыма в коптильной камере регулируется с помощью температуры корпуса дымогенератора, количества загруженных опилок, их влажности и степени измельчения, положения заслонки 4 (рисунок 1).

Схема размещения дымогенератора относительно коптильной камеры изображена на рисунке 2. В случае недостаточной температуры коптильного дыма при горячем копчении производится подогрев трубы, соединяющей дымогенератор и коптильную камеру, от постороннего источника.

⁸ Мезенова, О.Я., Ким, И.Н., Бредихин, С.А. Производство копченых пищевых продуктов. – М.: Колос, 2001. 208 с.

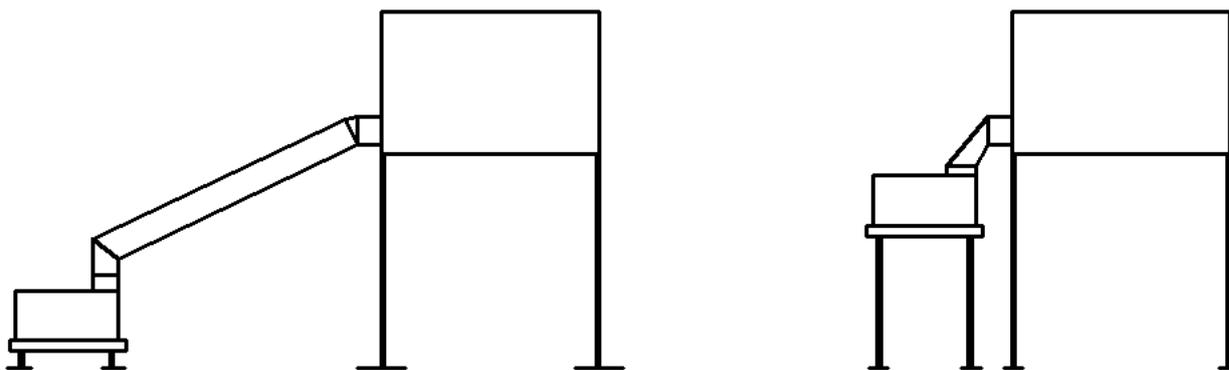


Рисунок 2. Схема размещения дымогенератора относительно коптильной камеры при различных способах копчения:
а) холодное копчение; б) горячее копчение

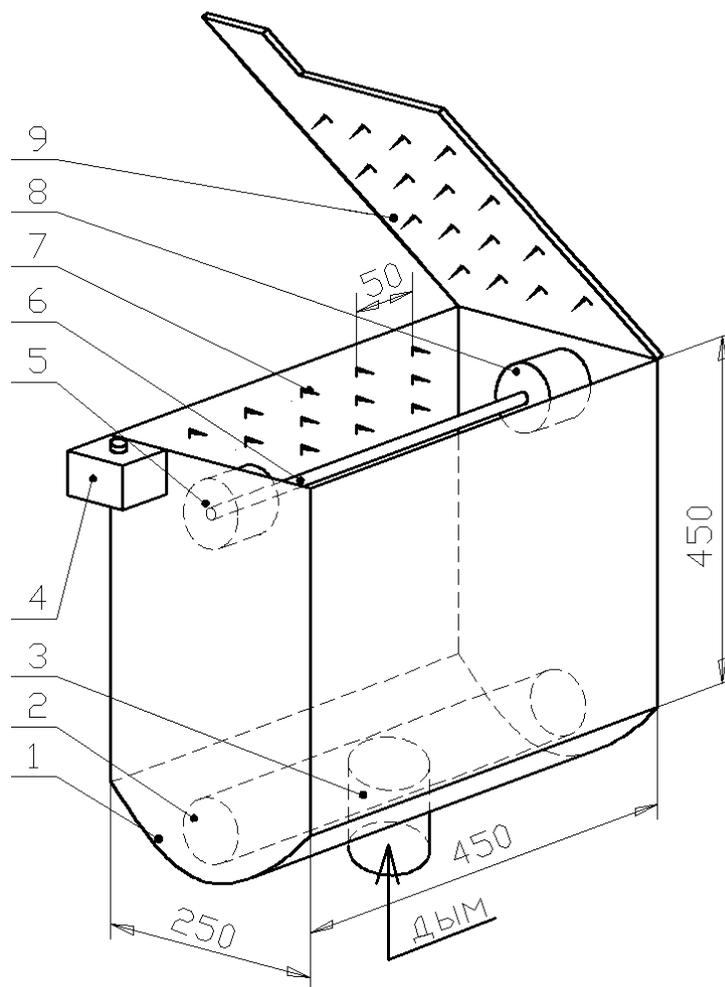
Для снижения выбросов коптильного дыма нами была изготовлена модернизированная коптильная камера, изготовленная на базе заводской установки УЭК-1 «Идиллия». Модернизация заключалась в размещении дополнительных электродов на внутренней части откидной верхней крышки коптильной камеры⁹. На рисунке 3 приведена схема модернизированной установки с дополнительными электродами.

Модернизированная установка электростатического копчения работает следующим образом. В первый момент времени, во время заполнения дымом коптильной камеры напряжение подается между положительным электродом 6 (рисунок 3) и электродами, находящимися на откидной крышке 9 (рисунок 3). Причем подается меньшее напряжение, необходимое для возникновения коронного разряда (порядка 10...12 кВ). При этом возникает электрофорез¹⁰, направленное движение частиц в электрическом поле.

Ударной ионизации не происходит, но выбросы дыма из коптильной камеры во время её заполнения значительно уменьшаются. Дым как бы «запирается» электрическим полем, воздух же беспрепятственно выходит наружу через щели между корпусом и верхней крышкой, обеспечивая быстрое заполнение коптильной камеры дымом.

⁹ Селунский, В.В., Банин, Р.В., Ябыков, К.Ж. Модернизация конструкции электростатической коптильной установки // АПК России. – 2018. – Том 25. – № 3. – С. 418–422.

¹⁰ Буторин, В.А., Селунский, В.В., Банин, Р.В., Ябыков, К.Ж. Оптимизация электростатического способа копчения рыбы // АПК России. – 2018. – Том 25. – № 1. – С. 92.



1 – торцовая часть корпуса; 2 – труба для распределения дыма; 3 – труба для приёма дыма от дымогенератора; 4 – блокировочный конечный выключатель; 5, 8 – высоковольтные изоляторы; 6 – электрод для подвешивания обрабатываемого продукта; 7 – коронирующий электрод; 9 – откидная крышка с дополнительными коронирующими электродами.

Рисунок 3. Модернизированная установка электростатического копчения.

Выводы

1. Дан анализ всех дымогенераторов, используемых при различных способах копчения рыбных продуктов.

2. Обоснована целесообразность использования при производстве рыбопродуктов технологии электростатического копчения. Сделан обзор установок электростатического копчения, выпускаемых отечественными производителями.

3. Показаны недостатки установки электростатического копчения УЭК-1 «Идиллия».

4. Даны предложения по модернизации УЭК-1 путем использования выносного дымогенератора тления и установки дополнительных электродов на верхней крышке установки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТАНТЕНКОВ БГУ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ

А.Г. Савиновских – к.т.н., заведующий кафедрой «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Ю.П. Ильин – к.т.н., доцент кафедры «Транспорт и электроэнергетика», ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

А.В. Белов – к.т.н., ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Н.Ю. Кузьмина – аспирант, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Н.В. Скородумова – аспирант, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет»

Д.А. Новикова – старший преподаватель, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Е.Р. Чупахин – студент, ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

Аннотация

Рассматривается задача нагрева сырья в горизонтальном реакторе биогазовой установки с теплоизолированной боковой поверхностью. Рассмотрено применение математических методов оптимального управления конечным температурным состоянием нестационарного теплового поля для цилиндра конечного размера решением одномерных задач для неограниченного цилиндра и пластины. С использованием критериев Померанцева, Предводителява, БИО, Фурье, преобразования Лапласа, уравнение Бесселя, теоремы разложения Ващенко–Захарченко, получено решение задачи теплопроводности в однородном поле с теплоизолированной боковой поверхностью (с внутренними источниками тепла) при заданных краевых и начальном условиях.

Одним из направлений энергетики России является использование нетрадиционных источников энергии¹. Это определяет увеличение вклада биомассы в энергетический баланс, в целях анаэробного производства биогаза². При этом одной из задач является задача оптимального управления процессами теплопроводности в реакторах биогазовых установок.

Рассматривается задача нагрева сырья в горизонтальном реакторе биогазовой установки с теплоизолированной боковой поверхностью. Решается уравнение теплопроводности для неограниченного цилиндра, имеющего внутренний источник тепла.

Анализ теплового режима биореактора осуществляется с помощью уравнений теплопроводности. При этом решение двумерной задачи нахождения нестационарного теплового поля (для цилиндра конечного размера) сводилось к определению одномерных задач (для неограниченного цилиндра и пластины). Решение уравнений сделано в предположении постоянства термических коэффициентов, равномерного по высоте нагрева стенок реактора и навозного субстрата, что снижает точность вычислений. Не учтен также перенос тепла парами влаги, перемещающимися внутри нагреваемого субстрата. Из уравнений может быть получено выражение относительной избыточной температуры для случая подогрева субстрата внешним источником тепла и для случая внутреннего источника тепла. Таким образом, получаются частные уравнения, которые характеризуют тепловой режим реактора метантенка при других способах подогрева навозного сырья.

Формально речь идет о сложных системах, состояние которых характеризуется одним или несколькими параметрами, распределенными в пространстве и времени. Из-за сложности технологических процессов переработки и особенностей физических процессов распространения тепла, возникающих в ходе переработки навоза, для математического моделирования используются краевые задачи математической физики, а также операторный

¹ Антонов, Ю.М. Основные аспекты энергосбережения в сельском хозяйстве // Энергосбережение в сельском хозяйстве. – М., 1998. – ч.1. С. 44–46; Дмитриев, С.В. Разработка гибридных генетических алгоритмов для решения задач оптимального управления динамическими системами: Автореферат дис... канд.техн.наук. – Ижевск, 2007. 125 с.; Свалова, М.В. Математическая модель процесса получения биогаза из отходов продукции птицеводства // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2008. – №3. – С.145–146 и др.

² Чмиль А.И. Математическое моделирование и оптимизация процессов метанового сбраживания животноводческих отходов // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1996. – №2. – С. 20-24; Варфоломеев, С.Д., Гуревич, К.Г. Биокинетика: Практический курс. – М.: ФАИР-ПРЕСС, 1999. 720 с.; Бутковский, А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М. : Наука. 1965. 474 с.

метод определяется функционалом специального вида, структура которого зависит от целей управления.

В ряде случаев управляемую систему принято считать одномерной. Теория оптимального управления позволяет подбирать параметры, которые обеспечат оптимальное функционирование исследуемого процесса.

Таким образом, разработка новых и усовершенствование существующих методов оптимального управления процессами теплопроводности является актуальной научной задачей.

Для решения задач оптимального управления процессом распространения тепла в реакторе используются сеточные методы в сочетании с методами оптимизации (методы проекции градиента и условного градиента)³, методы, основанные на разложении в ряды Фурье⁴, и другие⁵.

Как известно, процессы теплопроводности описываются параболическими уравнениями [19, 20]. Кроме того, параболическими уравнениями описываются нестационарные процессы диффузии, фильтрации.

Теоретическое исследование, а также постановка задач оптимального управления, описываемых параболическими уравнениями, приведено в [15, 21]. Каждый из перечисленных методов обладает рядом достоинств и недостатков. К недостатку сеточных методов⁶ следует отнести то, что решение задачи получается в виде массива чисел, дающих значение температуры только в отдельных точках расчетной области. В настоящей работе решение уравнений теплопроводности в реакторах БГУ представляется методом, основанным на решении непрерывной функции - линейной комбинации базисных функций.

Цели и задачи исследования. Целью настоящего исследования является применение математических методов оптимального управления конечным температурным состоянием нестационарного теплового поля для цилиндра

³ Бутковский, А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М. : Наука. 1965. 474 с.; Бутырин, В.И., Фильштинский, Л.А. Оптимальное управление температурным полем в стержне при программном изменении зоны управления//Прикладная механика. – 1976. – Т. 12, – №8. – С. 115 – 118 и др.

⁴ Бутковский, А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М. : Наука. 1965. 474 с.; Бутырин, В.И., Фильштинский, Л.А. Оптимальное управление температурным полем в стержне при программном изменении зоны управления//Прикладная механика. – 1976. – Т. 12, – №8. – С. 115 – 118, Лисковец, О.А. Вариационные методы решения неустойчивых задач. М. : Наука и техника. 1981, 344 с.

⁵ Фурсиков А.В. Оптимальное управление распределенными системами. Теория и приложения. Новосибирск: Научная книга. 1999. 352 с.; Уточнение математической модели влияния температуры на устойчивость режима переработки субстрата в БГУ / Ю.П.Ильин [и др.] // АПК России. – 2016. – Т.23 – №3. – С.567 – 574.

⁶ Уточнение математической модели влияния температуры на устойчивость режима переработки субстрата в БГУ / Ю.П.Ильин [и др.] // АПК России. – 2016. – Т.23 – №3. – С.567 – 574.

конечного размера решением одномерных задач для неограниченного цилиндра и пластины.

Нами для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- сформулировать соответствующую целям работы задачу оптимального управления процессом теплопроводности в однородном поле;
- с помощью уравнений теплопроводности выполнить анализ теплового режима нагрева навозного субстрата для нестационарного теплового поля;
- используя критерии Померанцева, Предводителя, БИО, Фурье, преобразование Лапласа, уравнение Бесселя, теорему разложения Ващенко – Захарченко, получить решение задачи теплопроводности в однородном поле с теплоизолированной боковой поверхностью (с внутренними источниками тепла) при заданных краевых и начальном условиях;
- рассмотреть различные способы задания частных решений, которые характеризуют тепловой режим реакторов БГУ при других способах подогрева субстрата.

Постановка задачи

Имеется однородное пространство реактора $0 \leq x \leq L$ с теплоизолированной боковой поверхностью (внутренние источники тепла присутствуют на его поперечных перегородках, создавая заданный температурный режим).

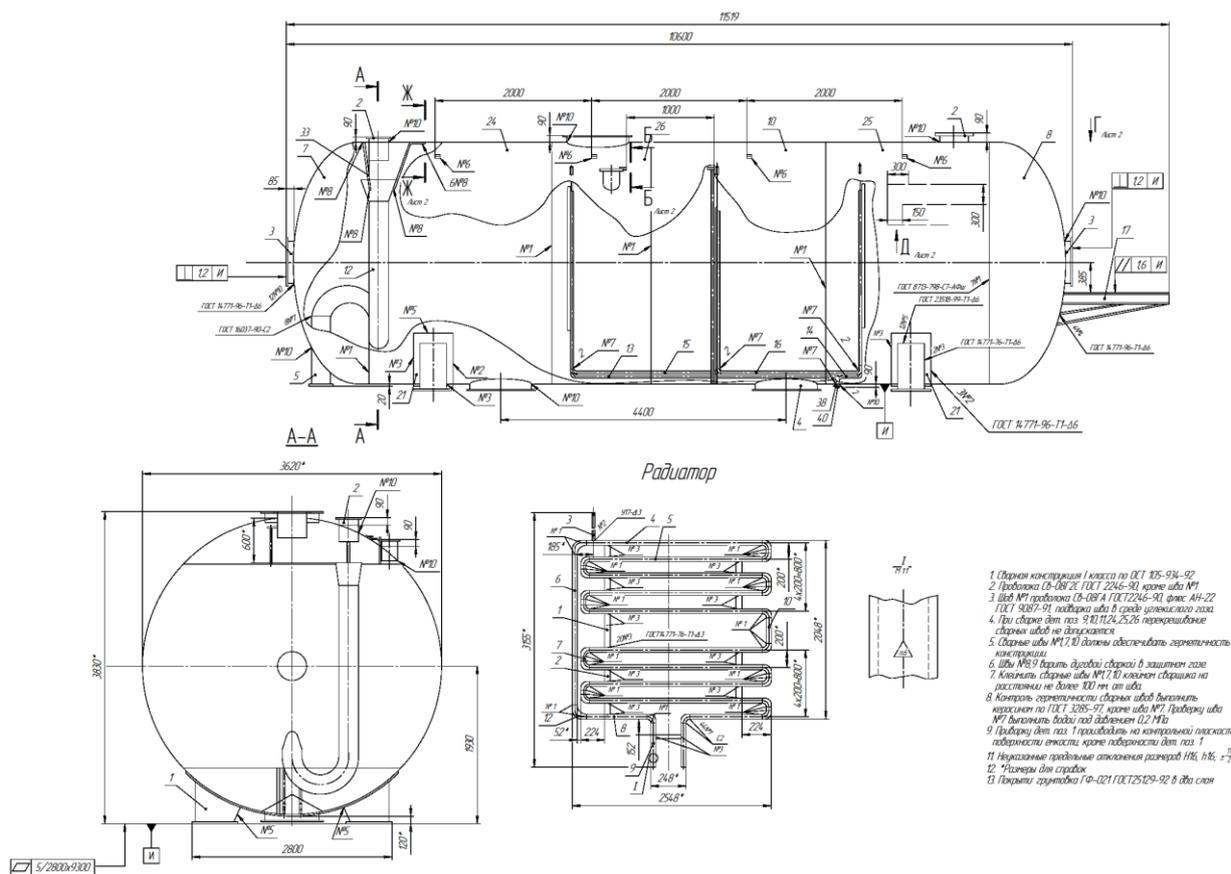


Рисунок 1. Емкость метантенка (сборочный чертеж)

При рассмотрении данного вопроса мы исходили из конструктивных параметров установки, которая включает несколько горизонтальных реакторов емкостью 75 м^3 , разделенных вертикальными перегородками на четыре секции. Перегородки смонтированы таким образом, что загружаемая масса от первой до четвертой секции проходит по синусоиде. Трубопроводы для подогрева сброживаемой массы смонтированы на перегородках с целью создания краевых и начальных условий. Боковые поверхности реактора теплоизолированы, дополнительных внутренних источников подогрева нет. Термодиффузия с помощью внутреннего источника тепла достаточно эффективна из-за высокой (выше 80% влажности субстрата) не только с поверхности, но и в глубине. Чему способствует периодическое перемешивание. Таким образом, при нагреве субстрата выделяются обособленно два источника тепла (внутренний – на перегородках и внешний – бак с подогревателями). Внутренний источник тепла действует непрерывно в течение всего процесса брожения. Его теплоотдачу во времени представим в виде:

$$\frac{W}{\gamma c} = \frac{W_0}{\gamma c} (1 - e^{-k\tau}), \quad (1)$$

где W_0 – максимальная удельная мощность источника, соответствующая установившемуся режиму переработки навозного субстрата, Вт/м³;

K - постоянная, равная максимальной относительной скорости изменения удельной скорости изменения удельной мощности (0,18...0,8):

$$k = \left. \frac{d\left(\frac{W}{W_0}\right)}{dt} \right|_{МАКС}, \quad (2)$$

τ - время, с;

γ - плотность тела, кг/ м³

c - удельная теплоемкость тела, Вт/ кг град,

Мощность источника тепла в метантенке определяется из уравнения

$$W_0 = D_i \% \cdot \frac{D}{100 \cdot V}$$

где P_m , % - мощность, расходуемая на нагрев субстрата в метантенке;

P – оптимальна мощность нагрева, Вт;

V – объем бака, м³.

Температура внутри бака нарастает по экспоненте

$$t_{бака} = t_m - (t_m - t_o) e^{-m\tau} \quad (3)$$

где t_m – максимальная температура бака в установившемся режиме нагрева,

K ;

t_0 – температура в начальный момент времени, равная температуре окружающего воздуха, К;

m – опытный коэффициент.

Пренебрегая рассеиванием и потерей тепла в воздушном промежутке между стенками бака и субстрата, считаем, что температура теплового пола подчиняется такому же закону

$$t_{окр.среды} = t_m - (t_m - t_o) e^{-m\tau} \quad (4)$$

При нагреве капиллярно-пористых тел, существует два периода:

1) период постоянной скорости, когда температура на поверхности тела постоянна и равна температуре мокрого термометра;

2) период падающей скорости, когда интенсивность испарения мала и температура тела возрастает.

Система реактора характеризуется несколькими параметрами, распределенными в пространстве и времени.

Особенностью мезофильного, термотолерантного и термофильного процессов является распространение тепла в ходе брожения навозного субстрата. Для математического моделирования принято использовать краевые задачи математической физики, а уравнение определять функционалом специального вида, структура которого зависит от целей управления.

Требуется найти распределение температуры внутри цилиндра в любой момент времени, а также среднюю температуру как функцию времени. Температура цилиндра конечного размера есть функция трех переменных: времени τ , радиуса r и координаты z . Нахождение температурного поля такого цилиндра связанного с решением следующего дифференциального уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right] + \frac{W_0}{\gamma c} (1 - e^{k\tau})$$

($\tau > 0, 0 < r < R, -l < z < l$)

(5)

где a – коэффициент теплопроводности.

При начальном условии

$$t(r, z, \tau) = t_0 = const$$

и при граничных условиях

$$\left. \begin{aligned} \left\{ -\frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} + H [t_m - (t_m - t_o)e^{-m\tau} - t(r, z, \tau)] \right\}_{r=R} &= 0 \\ \left\{ -\frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial z} + H [t_m - (t_m - t_o)e^{-m\tau} - t(r, z, \tau)] \right\}_{z=l} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $H = \frac{\alpha}{\lambda}$.

Здесь λ коэффициент теплопроводности, $\frac{ватт}{м.град}$.

Начало координат располагаем в центре цилиндра. Это делает задачу симметричной относительно оси z и нулевого сечения f_0 цилиндра, т.е.

$$\left. \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$$
(7)

$$\left| \frac{\partial t(r, z, \tau)}{\partial r} \right|_{z=0} = 0$$

Доказано (1), что относительная температура Θ в любой точке цилиндра равна

$$\Theta = \frac{t(r, z, \tau) - t_0}{t_m - t_0} = \frac{t(r, \tau) - t_0}{t_m - t_0} \cdot \frac{t(z, \tau) - t_0}{t_m - t_0} \quad (8)$$

Где $t_{(r, \tau)}$ и $t_{(z, \tau)}$ – температуры в той же точке неограниченного цилиндра и неограниченной пластины, пересечением которых образован цилиндр конечных размеров (рис. 2).

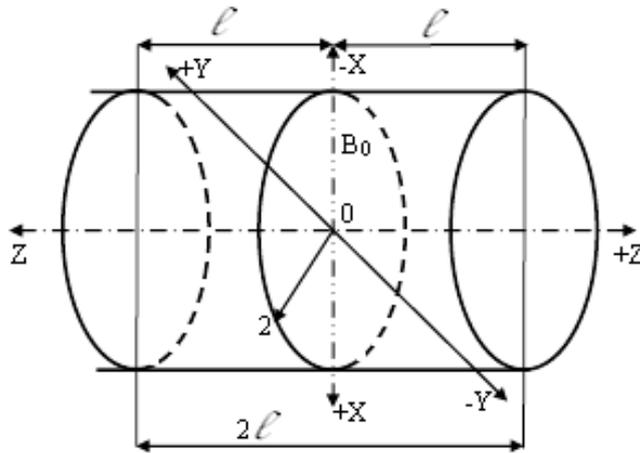


Рис. 2 Цилиндр конечных размеров

При этом дополнительные условия для неограниченного цилиндра конечных размеров, т.е.

а) для неограниченного цилиндра

$$\begin{aligned} t(r, 0) &= t_0 \\ -\frac{\partial t(R, \tau)}{\partial \tau} + H[t_m - (t_m - t_0)e^{-m\tau} - t(R, \tau)] &= 0 \\ \left| \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=0} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

б) для неограниченной пластины

$$\begin{aligned} t(r, 0) &= 0 \\ -\frac{\partial t(l, \tau)}{\partial z} + H[t_m - (t_m - t_0)e^{-m\tau} - t(l, \tau)] &= 0 \\ \left| \frac{\partial t(z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=0} &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Задача, следовательно, сводится к определению относительной температуры неограниченного цилиндра и пластины. Перемножение их

значений и дает распределение температуры внутри цилиндра в любой момент времени. Математически задача решается посредством операторного метода, так как при равномерном начальном распределении температуры операторный метод быстрее приведет к конечному результату.

Неограниченный цилиндр

Теплообмен между поверхностью цилиндра и нагреваемым субстратом происходит одинаково по всей поверхности, поэтому его температура зависит от времени и радиуса. Дифференциальное уравнение теплопроводности запишется так:

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] + \frac{W_0}{\gamma c} (1 - e^{k\tau}). \quad (11)$$

Дополнительные условия даны в выражении (9).

Решение уравнения (11) будет представлено зависимостью:

$$\begin{aligned} \frac{t(r, \tau) - t_0}{t_m - t_0} = \Theta = & 1 - \frac{\cos \sqrt{Pd^2} \cdot \frac{r}{R}}{\cos \sqrt{Pd_2} - \frac{1}{B_i} \cos \sqrt{Pd_2} \cdot \sin \sqrt{Pd_2}} \cdot \exp(-Pd_2 \cdot FO_1) - \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{1 - \frac{\mu_n^2}{Pd^2}} \cos \mu_n \frac{r}{R} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) + \frac{1}{4} PO \left(1 + \frac{2}{B_i} - \frac{2}{R^2} \right) - \\ & - \frac{PO}{Pd_i} \left[1 - \frac{\cos \sqrt{Pd^2} \cdot \frac{r}{R}}{\cos \sqrt{Pd_1} - \frac{1}{B_{i1}} \cos \sqrt{Pd_1} \cdot \sin \sqrt{Pd_1}} \right] \exp(-Pd_1 \cdot FO_1) - \\ & - PO \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{\frac{Pd_i}{\mu_n^2} - 1} \right) \frac{A_n}{1 - \frac{\mu_n^2}{Pn^2}} \cos \mu_n \frac{r}{R} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) \end{aligned} \quad (12)$$

Средняя температура цилиндра определяется

из выражения

$$\begin{aligned}
\frac{t(\tau) - t_0}{t_m - t_0} = \Theta = & 1 - \frac{2 \sin \sqrt{Pd_2}}{\sqrt{Pd_2} \cos \sqrt{Pd_2} - \frac{1}{B_i} Pd_2 \sin \sqrt{Pd_2}} \cdot \exp(-Pd_2 \cdot FO_1) - \\
& - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \frac{\mu_n^2}{Pd_2}} B_n \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) + \frac{1}{8} PO \left(1 + \frac{4}{B_i} \right) - \\
& - \frac{PO}{Pd_i} \left[1 - \frac{2 \sin \sqrt{Pd_1}}{\sqrt{Pd_1} \cos \sqrt{Pd_1} - \frac{1}{B_{i1}} Pd_1 \sin \sqrt{Pd_1}} \right] \exp(-Pd_1 \cdot FO_1) - \\
& - PO \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{\frac{Pd_1}{\mu_n^2} - 1} \right) \frac{B_n}{\mu_n^2} \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1)
\end{aligned} \tag{13}$$

Неограниченная пластина

Дана пластина толщиной 2ℓ . Продольные размеры этой пластины немного больше поперечных, поэтому она считается неограниченной. Пластина помещается в среду, температура которой изменяется по закону (4). Выбираем начало координат в середине пластины с тем, чтобы задача по отношению к нулевому сечению цилиндра стала четной, симметричной. Дополнительные условия выражены уравнением (10). Нахождение температурного поля связано с решением дифференциального уравнения теплопроводности, которое для нашего случая будет

$$\begin{aligned}
\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(z, \tau)}{\partial z^2} \\
(\tau > 0, 0 < z < \infty)
\end{aligned} \tag{14}$$

Решение уравнения (14) приведено Банниковым Ю.И. в [23] и имеет вид

$$\begin{aligned}
\Theta = \frac{t(z, \tau) - t_0}{t_m - t_0} = & 1 - \frac{\cos \sqrt{\frac{m}{a}} \frac{z}{l}}{\cos \sqrt{\frac{m}{a}} l - \frac{1}{H} \sqrt{\frac{m}{a}} \sin \sqrt{\frac{m}{a}} l} \cdot \exp(-m\tau) - \\
& - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{1 - \frac{a\mu_n^2}{ml^2}} \cos \mu_n \frac{z}{l} \exp\left(-\mu_n^2 \cdot \frac{a\tau}{l^2}\right)
\end{aligned} \tag{15}$$

Согласно критерия теплового подобия, зависимость выразится:

$$\Theta = 1 - \frac{\cos \sqrt{Pd_2} \frac{z}{l}}{\cos \sqrt{Pd_2} - \frac{1}{B_{i2}} \sqrt{Pd_3} \sin \sqrt{Pd_3}} \cdot \exp(-Pd_3 \cdot FO_2) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{1 - \frac{a\mu_n^2}{Pd_3}} \cos \mu_n \frac{z}{l} \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_2) \quad (16)$$

Средняя температура пластины будет

$$\bar{\Theta} = 1 - \frac{2 \sin \sqrt{Pd_3}}{\sqrt{Pd_3} \cos \sqrt{Pd_3} - \frac{1}{B_{i2}} Pd_3 \sin \sqrt{Pd_3}} \cdot \exp(-Pd_3 \cdot FO_2) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \frac{\mu_n^2}{Pd_3}} B_n \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_2) \quad (17)$$

Выводы

Решение двумерной задачи нахождения нестационарного теплового поля (для цилиндра конечного размера) сводилось к определению одномерных задач (для неограниченного цилиндра и пластины). Решение уравнений (11), (14) сделано в предположении постоянства термических коэффициентов, равномерного по высоте нагрева стенок бака и субстрата, что в известной степени снижает точность вычислений.

Не учтен также перенос тепла парами влаги, перемещающимися внутри нагреваемого материала.

Из уравнений (12) и (16) легко также получить выражение относительной избыточной температуры для случая нагрева субстрата внешним источником тепла.

В первом случае имеем:

а) для цилиндра

$k = 0, W = 0.$

$$\Theta = 1 - \frac{\cos \sqrt{Pd_2} \frac{r}{R}}{\cos \sqrt{Pd_2} - \frac{1}{B_{i1}} \sqrt{Pd_2} \sin \sqrt{Pd_2}} \cdot \exp(-Pd_2 \cdot FO_1) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{1 - \frac{\mu_n^2}{Pd_2}} \cos \mu_n \frac{r}{R} \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) \quad (18)$$

и

$$\bar{\Theta} = 1 - \frac{2 \sin \sqrt{Pd_2}}{\sqrt{Pd_2} \cos \sqrt{Pd_2} - \frac{1}{B_{i1}} Pd_2 \sin \sqrt{Pd_2}} \cdot \exp(-Pd_2 \cdot FO_1) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{1 - \frac{\mu_n^2}{Pd_2}} B_n \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) \quad (19)$$

б) для пластины

$k = 0$, $W = 0$ уравнения такие же, как (16) и (17).

Во втором случае имеем:

а) для цилиндра

$$m = 0; \quad t_c = t_0; \quad W = \frac{W_0}{\gamma c} = const$$

$$\Theta = 1 + \frac{1}{4} PO \left(1 + \frac{2}{B_{i1}} - \frac{r}{R_2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{PO}{\mu_n^2} \right) A_n \cdot \cos \mu_n \frac{r}{R} \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) \quad (20)$$

$$\Theta = 1 + \frac{1}{8} PO \left(1 + \frac{4}{B_{i1}} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{PO}{\mu_n^2} \right) B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_1) \quad (21)$$

б) для пластины

$$m = 0; \quad t_c = t_0; \quad W = 0$$

$$\Theta = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos \mu_n \frac{z}{l} \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_2) \quad (22)$$

$$\Theta = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot FO_2) \quad (23)$$

Таким образом, в результате получаем ряд частных решений, которые характеризуют тепловой режим метантенка.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАТОРА С НЕССИМЕТРИЕЙ ФАЗНЫХ ОБМОТОК СТАТОРА

В.Е. Глазырин – к.т.н., доцент, Новосибирский государственный технический университет

Г.В. Глазырин – к.т.н., доцент, Новосибирский государственный технический университет

Н.А. Митрофанов – студент, Новосибирский государственный технический университет

Аннотация

Рассматриваются переходные процессы синхронной машины без учета демпферных контуров. Предложен метод численного моделирования переходных процессов синхронной машины с возможностью учёта несимметрии обмотки статора. Метод основан на непосредственном решении дифференциальных уравнений равновесия э.д.с. и падений напряжений в обмотках в фазных координатах совместно с уравнением движения ротора. При этом контур каждой фазной обмотки статора описывается отдельным уравнением, и могут быть учтены отличающиеся параметры фаз. Математическая модель синхронного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку реализована в программном пакете MATLAB.

Существующие программные пакеты моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах, такие как MATLAB Simulink⁷, PSCAD, Mustang, используют для описания электромагнитных процессов синхронной машины уравнения Парка–Горева⁸, которые записываются в неподвижной относительно ротора системе координат и предполагают полную симметрию фазных обмоток статора. Очевидно, что такой метод моделирования не может быть применен для расчета процессов в поврежденной синхронной машине с отличающимися параметрами фазных обмоток.

В статье приведен вывод системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы трехфазной синхронной машины с учетом индивидуальных активных сопротивлений и индуктивностей обмоток. Далее произведено сравнение результатов моделирования переходных процессов синхронной машины, выполненного посредством библиотеки блоков SimPowerSystems, входящей в состав среды MATLAB Simulink, с результатами, полученными с помощью предложенного метода.

⁷ Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. 518 с.

⁸ Горов, А.А. Переходные процессы синхронной машины. – Л., Наука, 1985. 502 с.

Вывод системы дифференциальных уравнений для генератора, работающего на автономную нагрузку со схемой соединения «треугольник»

Рассмотрим синхронную машину, имеющую три фазных обмотки и контур возбуждения.

Обозначим через u_η ($\eta = a, b, c$) и u_f – мгновенные значения напряжений на фазных обмотках и обмотке возбуждения соответственно; i_η и i_f – мгновенные значения токов; ψ_η и ψ_f – результирующие потокосцепления обмоток; R_η и R_f – активные сопротивления фазных обмоток и обмотки возбуждения. Тогда дифференциальные уравнения равновесия э.д.с. и падений напряжений в контурах синхронной машины будут иметь вид⁹:

$$\begin{cases} u_\eta = -\frac{d\psi_\eta}{dt} - R_\eta i_\eta & (\eta = a, b, c); \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f. \end{cases} \quad (1)$$

Предлагаемый метод расчета переходных процессов основан на совместном решении уравнений (1), дополненных выражениями падений напряжений на сопротивлениях нагрузки. Такой подход делает возможным моделирование синхронной машины с различными параметрами фазных обмоток за счет описания электромагнитных процессов в каждой фазе отдельным дифференциальным уравнением.

Наиболее простая результирующая система дифференциальных уравнений получается в случае подключения нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом, не имеющим сопротивления¹⁰: достаточно выполнить замену u_η на $L_{нг.\eta}(di_\eta/dt) + R_{нг.\eta}i_\eta$ в уравнении (1).

В статье рассмотрен случай работы генератора на автономную нагрузку, подключенную по схеме «треугольник» рисунок 1.

При расчете режимов работы генератора необходимо учесть следующие преобразования, в которых u_k ($k = ab, bc, ca$) – мгновенные значения линейных напряжений на выводах синхронной машины; i_k – мгновенные значения линейных токов:

⁹ Ульянов, С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. 518 с.

¹⁰ Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины. – Л., Наука, 1985. 502 с.

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b; & \begin{cases} i_a = i_{ab} - i_{ca}; \\ i_b = i_{bc} - i_{ab}; \\ i_c = i_{ca} - i_{bc}. \end{cases} \\ u_{bc} = u_b - u_c; \\ u_{ca} = u_c - u_a; \end{cases}$$

Тогда уравнения равновесия э.д.с. и падений напряжений в контурах синхронной машины (1) будут определяться как:

$$\begin{cases} u_{ab} = -\frac{d\psi_{ab}}{dt} - (R_{g.a}i_a - R_{g.b}i_b); \\ u_{bc} = -\frac{d\psi_{bc}}{dt} - (R_{g.b}i_b - R_{g.c}i_c); \\ u_{ca} = -\frac{d\psi_{ca}}{dt} - (R_{g.c}i_c - R_{g.a}i_a), \end{cases} \quad (2)$$

где $R_{g,\eta}$ ($\eta = a, b, c$) – активное сопротивление контура фазной обмотки, u_k ($k = ab, bc, ca$) – мгновенные значения линейных напряжений на выводах синхронной машины, $\psi_{ij} = \psi_i - \psi_j$.

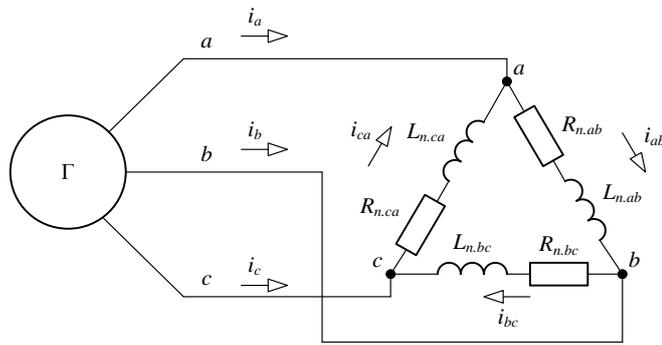


Рисунок 1. Схема подключения нагрузки

При расчете режимов работы генератора система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{ab}}{dt} = -L_{n,ab} \frac{di_{ab}}{dt} - [(R_{g.a} + R_{g.b} + R_{n,ab})i_{ab} - R_{g.a}i_{ca} - R_{g.b}i_{bc}]; \\ \frac{d\psi_{bc}}{dt} = -L_{n,bc} \frac{di_{bc}}{dt} - [(R_{g.b} + R_{g.c} + R_{n,bc})i_{bc} - R_{g.b}i_{ab} - R_{g.c}i_{ca}]; \\ \frac{d\psi_{ca}}{dt} = -L_{n,ca} \frac{di_{ca}}{dt} - [(R_{g.c} + R_{g.a} + R_{n,ca})i_{ca} - R_{g.c}i_{bc} - R_{g.a}i_{ab}]; \\ \frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f, \end{cases} \quad (3)$$

где $R_{n,k}$ – активное сопротивление нагрузки ($k = ab, bc, ca$), $L_{n,k}$ – индуктивность нагрузки.

Для упрощения восприятия условно примем замену переменных, где $L_{k\Sigma}$ ($k = ab, bc, ca$) – суммарные собственные индуктивности контуров, $M_{k,e}$ –

эквивалентные взаимные индуктивности контуров, $u_{\Sigma k}$ – мгновенные значения падений напряжения на активных сопротивлениях контуров:

$$\begin{cases} L_{ab\Sigma} = L_a + L_b - 2M_{ab} + L_{n.ab}; \\ L_{bc\Sigma} = L_b + L_c - 2M_{bc} + L_{n.bc}; \\ L_{ca\Sigma} = L_c + L_a - 2M_{ca} + L_{n.ca}; \\ M_{ab.e} = M_{bc} + M_{ab} - M_{ca} - L_b; \\ M_{bc.e} = M_{bc} + M_{ca} - M_{ab} - L_c; \\ M_{ca.e} = M_{ca} + M_{ab} - M_{bc} - L_a; \\ u_{\Sigma ab} = (R_{g.a} + R_{g.b} + R_{n.ab})i_{ab} - R_{g.a}i_{ca} - R_{g.b}i_{bc}; \\ u_{\Sigma bc} = (R_{g.b} + R_{g.c} + R_{n.bc})i_{bc} - R_{g.b}i_{ab} - R_{g.c}i_{ca}; \\ u_{\Sigma ca} = (R_{g.c} + R_{g.a} + R_{n.ca})i_{ca} - R_{g.c}i_{bc} - R_{g.a}i_{ab}. \end{cases} \quad (4)$$

Введя допущение о линейности зависимости между потокосцеплениями обмоток и протекающими в них токами можно записать следующую систему уравнений [3]:

$$\begin{cases} \psi_{ab} = i_{ab}L_{ab\Sigma} + i_{bc}M_{ab.e} + i_{ca}M_{ca.e} + (M_{af} - M_{bf})i_f + (M_{ayd} - M_{byd})i_{yd} + (M_{ayq} - M_{byq})i_{yq}; \\ \psi_{bc} = i_{ab}M_{ab.e} + i_{bc}L_{bc\Sigma} + i_{ca}M_{bc.e} + (M_{bf} - M_{cf})i_f + (M_{byd} - M_{cyd})i_{yd} + (M_{byq} - M_{cyq})i_{yq}; \\ \psi_{ca} = i_{ab}M_{ca.e} + i_{bc}M_{bc.e} + i_{ca}L_{ca\Sigma} + (M_{cf} - M_{af})i_f + (M_{cyd} - M_{ayd})i_{yd} + (M_{cyq} - M_{ayq})i_{yq}; \\ \psi_f = i_{ab}(M_{af} - M_{bf}) + i_{bc}(M_{bf} - M_{cf}) + i_{ca}(M_{cf} - M_{af}) + L_f i_f + M_{fyd}i_{yd}. \end{cases} \quad (5)$$

Коэффициенты пропорциональности L_a , L_b , L_c , L_f , есть собственные индуктивности фазных обмоток, обмотки возбуждения, символом M обозначены взаимные индуктивности обмоток. Как определяются эти коэффициенты подробно раскрыто в [3] и останавливаться на их рассмотрении не имеет смысла. Стоит лишь отметить, что большинство индуктивностей, входящих в выражение (5), являются функциями угла поворота ротора γ . При нарушении симметрии фазных контуров статора эти индуктивности могут быть определены с помощью дополнительного коэффициента, учитывающего долю замкнувшихся витков $k_{w\eta}$ ($\eta = a, b, c$).

Решение системы уравнений (1) включает в себя определение производной $d\psi_k/dt$ от сложной функции, зависящей от токов в контурах и угла поворота ротора. Для этого к системе (3) применим следующую формулу производной сложной функции:

$$\frac{d\psi_k}{dt} = \frac{\partial \psi_k}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{dt} + \sum_m \frac{\partial \psi_m}{\partial i_m} \frac{di_m}{dt} \quad (k, m = ab, bc, ca, f, yd, yq)$$

и подставим полученные выражения в (1). Так как процесс определения производных для разных контуров однотипен, рассмотрим лишь одно уравнение для контура “*ab*” статора:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{ab}}{dt} &= \frac{\partial\psi_{ab}}{\partial\gamma} \omega + \frac{di_{ab}}{dt} L_{ab.e} + \frac{di_{bc}}{dt} M_{.ab.e} + \frac{di_{ca}}{dt} M_{ca.e} + (M_{af} - M_{bf}) \frac{di_f}{dt} =, \\ &= -L_{n.ab} \frac{di_{ab}}{dt} - u_{\Sigma ab}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения для остальных контуров могут быть получены тем же способом.

Частную производную потокосцепления по углу, входящую в (6), выразим из (5):

$$\frac{\partial\psi_{ab}}{\partial\gamma} = \frac{dL_{ab.e}}{d\gamma} i_{ab} + \frac{dM_{.ab.e}}{d\gamma} i_{bc} + \frac{dM_{ca.e}}{d\gamma} i_{ca} + \frac{d(M_{af} - M_{bf})}{d\gamma} i_f. \quad (7)$$

Полученные в (7) производные индуктивностей по углу можно определить, зная исходные выражения индуктивностей, полученные в исследовании¹¹.

В результате подстановки (7) в (6) получим уравнение, связывающее функции времени – токи в обмотках и угол поворота ротора – и производные этих функций.

При рассмотрении всех контуров синхронной машины вместо одного уравнения (6) получим следующую систему уравнений в матричном виде для нагрузки, подключенной по схеме «треугольник»:

$$\begin{bmatrix} L_{ab\Sigma} & M_{.ab.e} & M_{ca.e} & M_{abf} \\ M_{.ab.e} & L_{bc\Sigma} & M_{bc.e} & M_{bcf} \\ M_{ca.e} & M_{bc.e} & L_{ca\Sigma} & M_{caf} \\ M_{abf} & M_{bcf} & M_{caf} & L_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} di_{ab}/dt \\ di_{bc}/dt \\ di_{ca}/dt \\ di_f/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\partial\psi_{ab}/\partial\gamma)\omega - u_{\Sigma ab} \\ -(\partial\psi_{bc}/\partial\gamma)\omega - u_{\Sigma bc} \\ -(\partial\psi_{ca}/\partial\gamma)\omega - u_{\Sigma ca} \\ -(\partial\psi_f/\partial\gamma)\omega - R_f i_f + u_f \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где M_{kf} , M_{kyd} , M_{kyq} ($k = ab, bc, ca$) – значения взаимной индуктивности обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферных обмоток.

Полученная система уравнений (8) позволяет определять производные токов в обмотках по известным значениям функций (токов, угла поворота ротора и частоты).

¹¹ Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины. – Л., Наука, 1985. 502 с.

Для описания электромеханических процессов синхронной машины воспользуемся дифференциальным уравнением движения ротора в форме д'Аламбера¹²:

$$M_T - J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial W_M}{\partial \gamma} = 0, \quad (9)$$

где M_T – момент турбины, J – момент инерции ротора, W_M – энергия магнитных полей машины, которая может быть определена по формуле¹³:

$$W_M = \frac{1}{2} \sum_k i_k \Psi_k, \quad k = a, b, c, f, yd, yq. \quad (10)$$

При подстановке (10) в (9) и преобразований получим следующее выражение для расчета производной частоты по известным значениям функций:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_T}{J\omega} + \frac{1}{2J} \left(i_a \frac{\partial \Psi_a}{\partial \gamma} + i_b \frac{\partial \Psi_b}{\partial \gamma} + i_c \frac{\partial \Psi_c}{\partial \gamma} + i_f \frac{\partial \Psi_f}{\partial \gamma} + i_{yd} \frac{\partial \Psi_{yd}}{\partial \gamma} + i_{yq} \frac{\partial \Psi_{yq}}{\partial \gamma} \right), \quad (11)$$

где P_T – мощность турбины. Частные производные потокосцеплений по углу, полученные в (12), входят также в систему уравнений (8), и их определение уже рассмотрено ранее.

Для получения полной системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы синхронной машины, необходимо (8) и (11) дополнить связью между угловой частотой и углом поворота ротора:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega. \quad (12)$$

Описание метода численного моделирования

Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (разностными методами) требует расчета производных функций по известным значениям самих функций на каждом шаге интегрирования¹⁴. Для этого система обычно представляется в форме Коши. В рассматриваемом случае два уравнения (11) и (12) содержат по одной производной в левой части, в то время как оставшиеся уравнения заданы в матричном виде (8), причем разделение переменных затруднительно из-за большого порядка матриц.

Кроме того, указанные уравнения имеют переменные коэффициенты, зависящие от угла поворота ротора γ . В итоге требуется пересчет большинства

¹² Там же.

¹³ Там же.

¹⁴ Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB, 3-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 720 с.; Турчак Л.И. Основы численных методов: Учеб. пособие. – М.: Наука., 1987. 318 с.

коэффициентов на каждом шаге интегрирования, и представление (8) в явной форме Коши не обеспечило бы существенного снижения объема вычислений.

Предложенная математическая модель синхронного генератора реализована при помощи программного пакета MATLAB. Для решения системы дифференциальных уравнений использована функция ode45, основанная на одношаговом явном методе Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка¹⁵. За основу метода расчета производных при численном решении системы дифференциальных уравнений взят алгоритм, предложенный в исследовании¹⁶.

Верификация реализуемой модели

В качестве примера для сравнения моделей выполнены расчеты переходных процессов генератора ТВВ-200-2АУЗ с полной симметрией фазных обмоток статора и следующими параметрами: $S_{\text{ном}} = 235.3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ном}} = 15.75 \text{ кВ}$, $f_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}$, $x_d = 2.106$, $x'_d = 0.272$, $x''_d = 0.1805$, $x_q = 2.106$, $x''_q = 0.1805$, $x_\sigma = 0.166$, $T'_d = 0.91 \text{ с}$, $T''_d = 0.114 \text{ с}$, $T''_q = 0.114 \text{ с}$, активное сопротивление обмотки статора $R_s = 0.00152 \text{ Ом}$.

Работа генератора рассматривается нескольких режимах: в нормальном установившемся режиме под нагрузкой, подача напряжения на обмотку возбуждения при отключенной нагрузке.

Результаты расчетов в нормальном установившемся режиме под нагрузкой с помощью моделирования численным методом и в среде MATLAB Simulink приведены на рисунках 2 и 3.

¹⁵ Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – Москва: ДМК Пресс, 2012. – 288 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/synchronousmachine.html?searchHighlight=synchronous%20machine>

¹⁶ Глазырин, Г.В. Моделирование переходных процессов синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора: Вестник МЭИ. –2017. –№5. – С. 34–39.

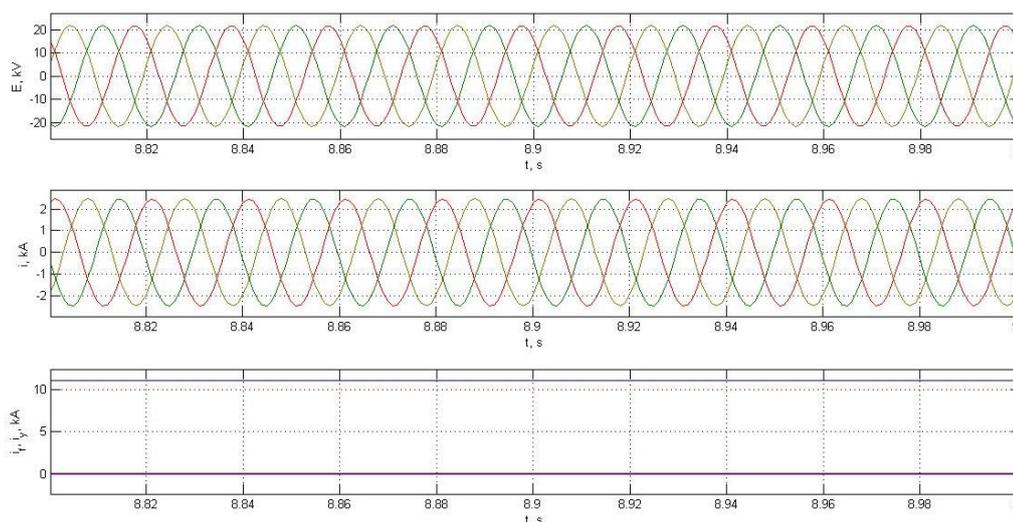


Рисунок 2. Результаты расчетов численным методом моделирования в нормальном установившемся режиме под нагрузкой

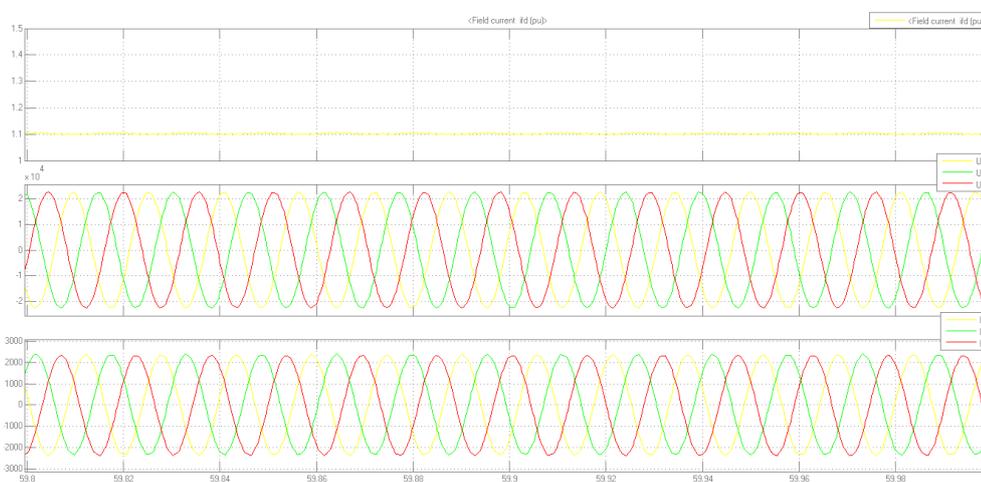


Рисунок 3. Результаты расчетов в среде Simulink в нормальном установившемся режиме под нагрузкой

Из сравнения полученных результатов нормального установившемся режима работы генератора можно увидеть, что при численном методе моделирования имеем следующее: амплитудное значение э.д.с. контуров статора составляет $e_a = 22.23$ кВ, амплитудное значение тока фазного контура статора $i_a = 2.53$ кА. При моделировании генератора в среде MATLAB Simulink эти значения составляют: $e_a = 22.24$ кВ, $i_a = 2.46$ кА соответственно.

Результаты расчетов при подаче напряжения на обмотку возбуждения и отключенной нагрузке с помощью моделирования численным методом и в среде Simulink приведены на рисунках 4 и 5.

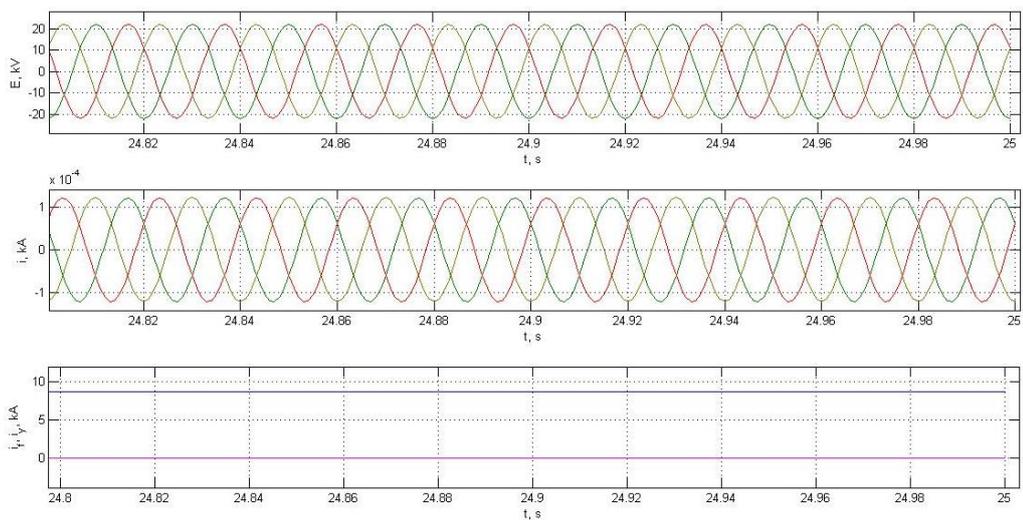


Рисунок 4. Результаты расчетов численным методом моделирования при подаче напряжения на обмотку возбуждения и отключенной нагрузке

Сравнение полученных результатов режима холостого хода генератора показывает, что при численном методе моделирования амплитудное значение э.д.с. контуров статора составляет $e_a = 22.24$ кВ. При моделировании генератора в среде MATLAB Simulink $e_a = 22.25$ кВ.

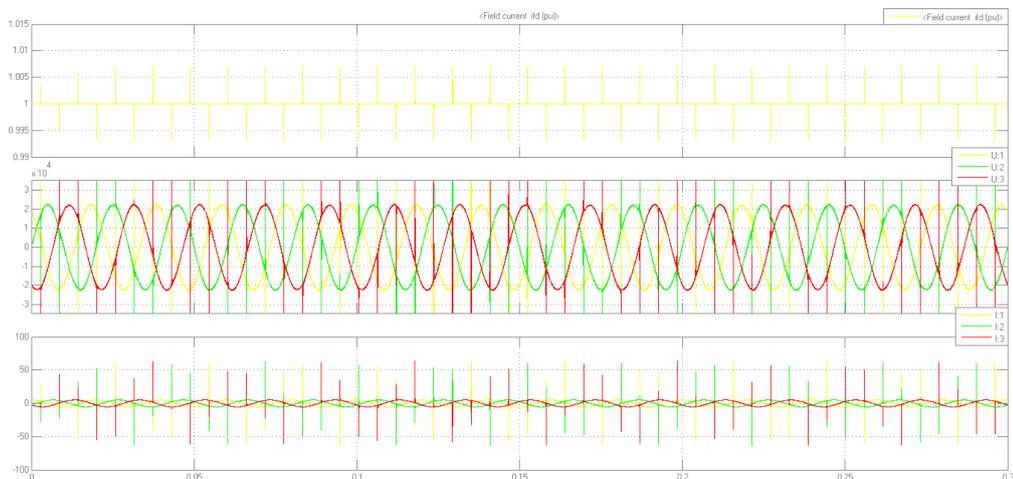


Рисунок 5. Результаты расчетов в среде Simulink при подаче напряжения на обмотку возбуждения и отключенной нагрузке

Выводы

Полученные в ходе исследования результаты сравнения расчетного метода и модели в среде MATLAB Simulink при работе с симметричными фазными контурами статора и без учета насыщения магнитной системы показали достоверность предлагаемого численного метода моделирования.

Реализованная математическая модель дает возможность рассматривать влияние несимметрии фазных контуров статора и насыщения магнитной системы при моделировании синхронной машины.

В перспективе предлагаемый метод позволит использовать результаты расчетов переходных процессов синхронной машины для анализа работы и создания новых алгоритмов релейной защиты генераторов электростанций.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

С.Ю. Петухова – к.т.н., доцент, Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина

М.О. Рыжов – инженер отдела электроснабжения и связи, АО «Гидропроект»

Аннотация

В статье рассмотрен общий алгоритм расчета токов короткого замыкания, предназначенный для выбора электрооборудования на примере системы собственных нужд Нижегородской гидроэлектростанции в условиях ее реконструкции и увеличения общестанционных нагрузок собственных нужд, связанных с увеличением выработки электроэнергии гидроэлектростанцией. Представлено описание блок-схем алгоритмов расчета для программного обеспечения, разрабатываемого в среде Borland Delphi.

Введение. Программа инновационного развития Группы РусГидро за 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 г. предусматривает развитие технологий повышения надежности, энергетической эффективности и экономичности эксплуатации оборудования. Система собственных нужд гидроэлектростанций предназначена для обеспечения электрической энергией систем управления гидро- и электротехническим оборудованием, систем охлаждения гидрогенераторов и трансформаторов, систем вентиляции, освещения. Даже при соответствующих условиях технической эксплуатации и проведении своевременных ремонтно-восстановительных работ электрооборудование собственных нужд гидроэлектростанции подлежит модернизации и реконструкции. Для выбора электрооборудования необходим расчет токов короткого замыкания.

Объекты и методы. Объектом исследования является Нижегородская гидроэлектростанция (ГЭС). Установленная мощность оборудования Нижегородской ГЭС 520 МВт. Расход электроэнергии на собственные нужды ГЭС составляет 11,395 млн.кВтч. Анализ динамики выработки электроэнергии ГЭС за последние три года, показанной на Рисунке 1, позволяет выявить положительный тренд. При этом происходит увеличение и общестанционных нагрузок собственных нужд 0,4 кВ.

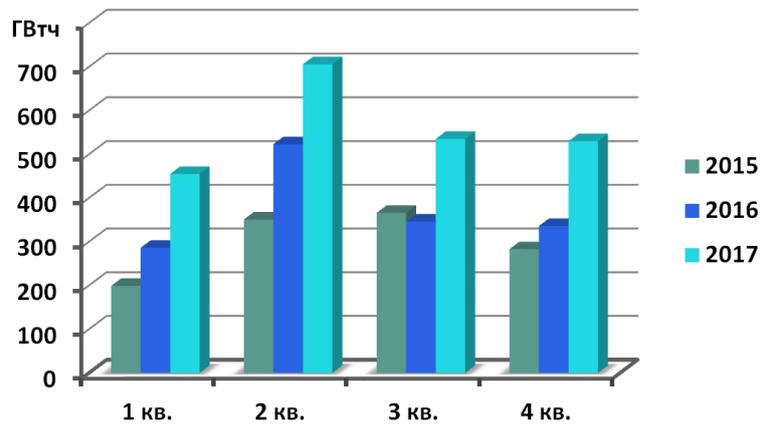


Рисунок 1. Выработка электроэнергии на Нижегородской ГЭС

В 2013 г. на Нижегородской ГЭС было проведено энергетическое обследование электрооборудования системы собственных нужд 6/0,4 кВ и выявлена целесообразность замены силовых трансформаторов собственных нужд, замены силовых кабелей, модернизации высоковольтных выключателей, модернизации комплексов устройств релейной защиты и автоматики на новые микропроцессорные устройства, свободно интегрируемые в системы АСУ ТП всех уровней.

Для выбора электрооборудования собственных нужд потребовалось разработать алгоритм расчета токов короткого замыкания с последующим применением программного обеспечения в среде Borland Delphi.

Экспериментальная часть. Разработанная блок-схема алгоритма расчета токов короткого замыкания (КЗ) показана на Рисунке 2.

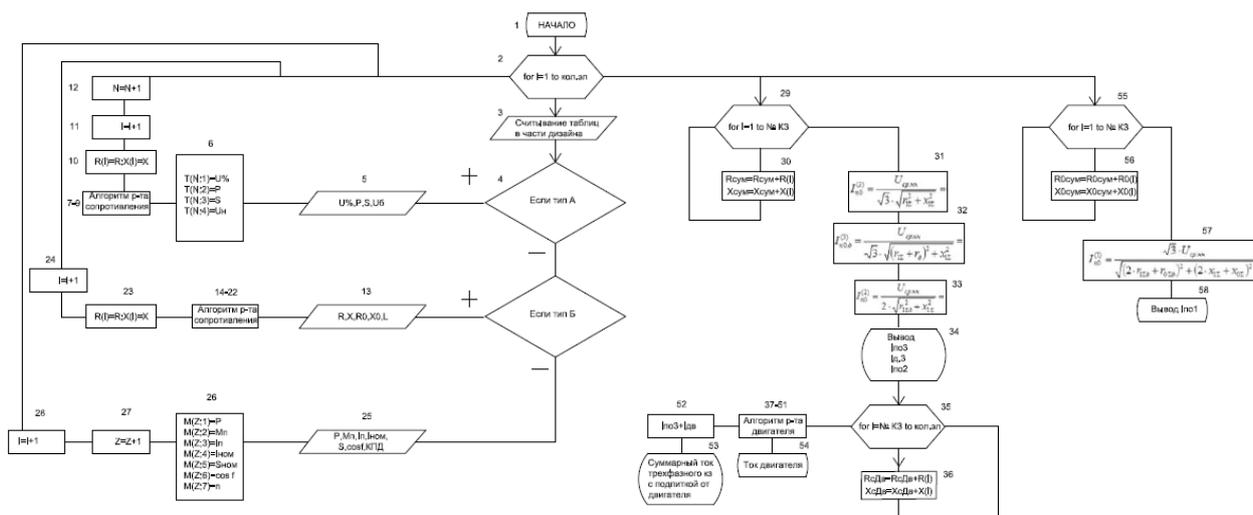


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма расчета токов короткого замыкания

Первыми блоками в данной схеме является цикл и алгоритм считывания таблиц. Соответственно, на каждом шаге цикла происходит упорядоченное

считывание таблицы конкретного элемента на рабочем экране. Назначение и содержание блоков алгоритма расчета токов КЗ, показанного на Рисунке 2, приведено в Таблице.

Таблица 1 – Содержание блоков алгоритма расчета токов короткого замыкания.

№ блоков	Содержание блоков
1	Начало работы алгоритма. Завершено составление и настройка элементов схемы на рабочем экране.
2-4	Считывание элементов с рабочего экрана. Анализ их положения на схеме и их типа.
5,6	Считывание данных с таблицы элемента и занесение их в матрицу данных соответствующий типу «трансформатор».
7-9	Алгоритм расчета сопротивления трансформатора
10,23	Занесение данных в массив сопротивлений.
11,12,24,27,28	Счетчик порядкового номера элемента и порядкового номера типа элемента
13	Считывание данных из таблицы сопротивлений.
14-22	Алгоритм расчета базисного сопротивления.
25	Считывание данных из таблицы электродвигателя.
25-26	Считывание данных с таблицы элемента и занесение их в матрицу данных соответствующий типу «электродвигатель».
29-30	Цикл-сумматор всех сопротивлений до точки КЗ построенной схемы.
31-34	Расчет токов КЗ без учета подпитки от электродвигателей.
35-36	Цикл-сумматор всех сопротивлений от точки КЗ до электродвигателя в построенной схеме.
37-54	Алгоритм расчета тока подпитки от электродвигателя и вывод данных.
55-56	Сумматор сопротивлений нулевой последовательности до точки КЗ.
57-58	Расчет тока однофазного КЗ.

Данные различных типов элементов записываются в матрицы типа $T[n,x]$. Где T - тип элемента («трансформатор», «двигатель» и т.д.), n - порядковый номер среди элементов данного типа, z - входные параметры элемента.

Далее происходит обработка считанных данных, в результате которой на выходе создается массив расчетных сопротивлений в базисном виде. В зависимости от разработки дизайна после алгоритма считывания и обработки элементов возможно удаление нулевых элементов.

По окончании расчета сопротивлений схемы замещения выполняется расчет токов короткого замыкания и токов подпиток электродвигателей. Соответственно, для расчета КЗ суммируются все элементы массива

сопротивления до номера КЗ и полученные значения подставляются в расчетные формулы¹.

При расчете сопротивлений кабельных линий (Рисунок 3) происходит упорядоченная проверка рабочего экрана таким образом, что определяется ближайший элемент с типом «трансформатор», порядковый номер таблицы которого меньше, чем порядковый номер таблицы кабельной линии. Из таблицы трансформатора выбирается номинальное напряжение и далее рассчитывается базисное сопротивление кабельной линии.

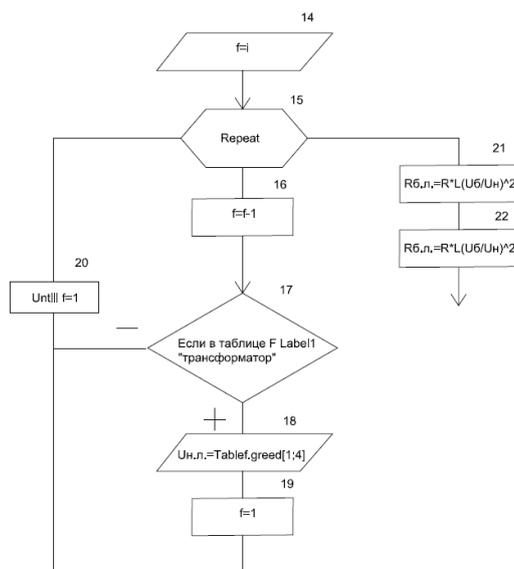


Рисунок 3. Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений кабельных линий

Перед началом расчета выполняется проверка, находится ли точка КЗ за трансформатором. На Рисунке 4 показана Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений трансформаторов.

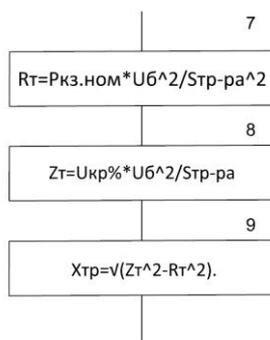


Рисунок 4. Блок-схема алгоритма расчета сопротивлений трансформатора

¹ Короткие замыкания и выбор электрооборудования: учебное пособие для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев и др.; под ред. И.П. Крючкова, В.А. Старшинова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 568 с.

При расчете подпитки от двигателя суммируются соответствующие элементы после точки короткого замыкания. Выходными данными в итоге могут быть не только токи, но и ЭДС, периодические и аperiodические расчетные коэффициенты электродвигателя.

Запускается цикл, в котором перечислением от порядкового номера точки КЗ до электродвигателя считывается тип элементов таблиц с данными номерами. Для получения выходных данных предварительно определяются активные и реактивные сопротивления электродвигателя. Затем выполняются расчеты постоянной времени затухания периодической составляющей тока статора, постоянной времени затухания аperiodической составляющей тока статора. Определяются токи двигателей. Блок-схема алгоритма расчета параметров электродвигателя показана на Рисунке 5.

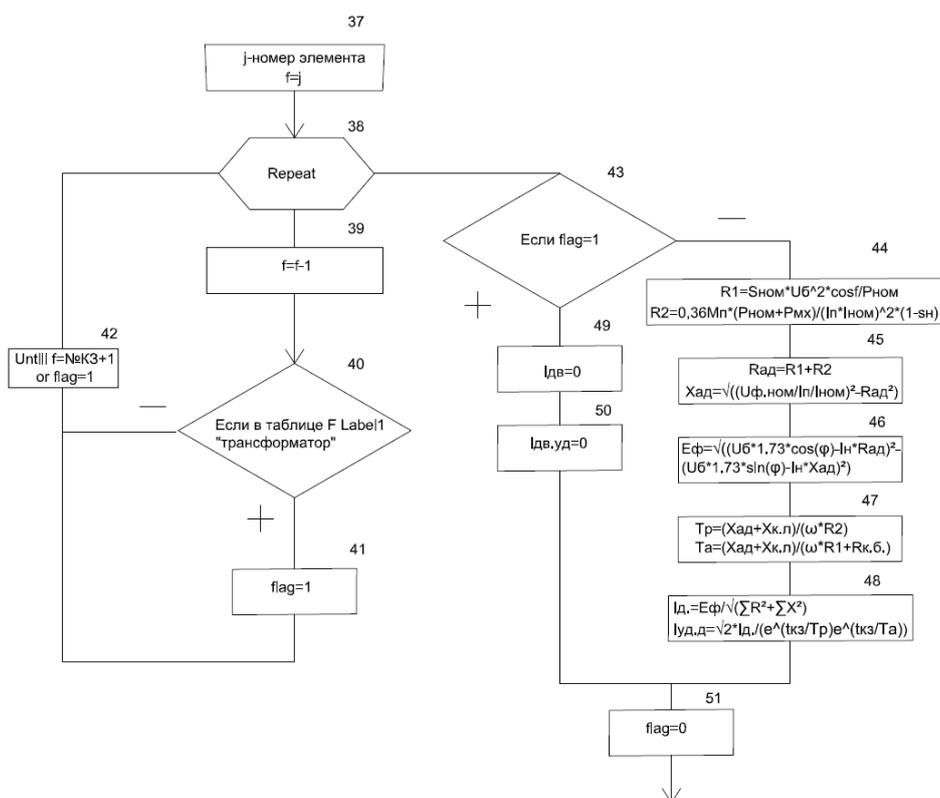


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма расчета параметров электродвигателя.

Результаты и их обсуждение. Программное обеспечение для расчета токов короткого замыкания при выборе электрооборудования системы собственных нужд гидроэлектростанции разрабатывается в среде Borland Delphi и состоит из двух частей. Первая часть. В ней отображается панель инструментов, из которой можно будет выбрать области работа пользователя: в области конструктора или в области вывода результатов. В области

конструктора пользователь располагает элементы схемы выводя их на рабочий экран с помощью подменю, в котором располагаются типы элементов схемы. При выборе требуемых элементов рабочего экрана появляются окна с таблицами, в которых размещаются данные для выбранных элементов. Вторая часть. Непосредственная обработка результатов после считывания данных из таблиц.

Предположим, пользователь вывел на рабочий экран, показанный на Рисунке 6, простейшую схему из четырех элементов, расположенных следующим образом: «1» сопротивление энергосистемы, «2» трансформатор, «3» кабельная линия, «4» электродвигатель. В зависимости от свойств элементов им присваивается соответствующий тип для дальнейшей обработки данных.

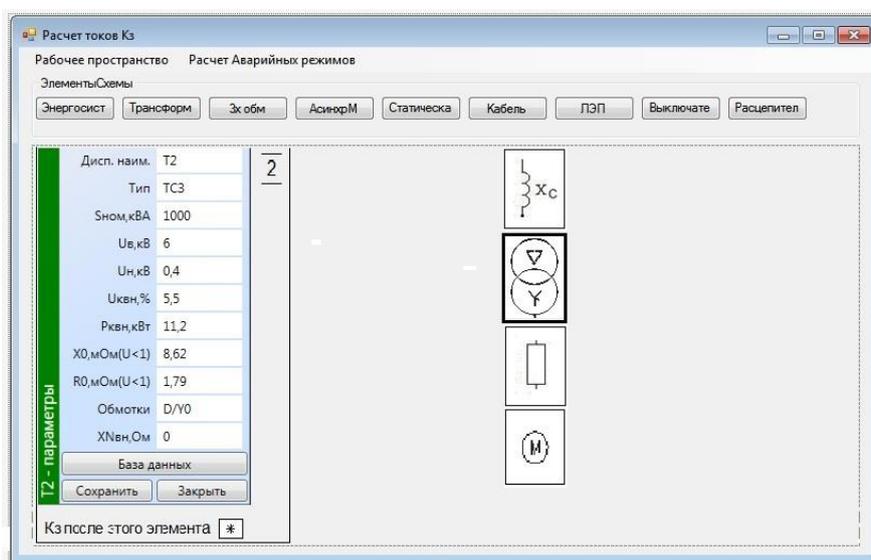


Рисунок 6. Рабочий экран

В разработке дизайна элементам и соответствующим им таблицам присваивается номер в зависимости от положения их на рабочем экране. Кроме того, в области дизайна имеется флаг (номер элемента, после которого располагается точка КЗ). Например, для схемы, фрагмент которой показан на Рисунке 6, элемент обозначен жирной линией и присвоен номер «2». В начале расчетной части также требуется знать базисное напряжение. Для этого рассматривается номинальное напряжение ближайшего элемента с меньшим или равным порядковым номером флага с типом «трансформатор», которое и принимается как базисное. Таким образом, в части дизайна получены все необходимые сведения и программа готова к расчету.

Заключение. Разработанный алгоритм предназначен для выполнения расчетов токов короткого замыкания при выборе электрооборудования системы собственных нужд гидроэлектростанции при реконструкции.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ PLM-СИСТЕМЫ В РОССИЙСКОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

*С.В. Болховитина – студент, Государственный университет управления,
Институт отраслевого менеджмента, Управление в энергетике*

*Научный руководитель – к.э.н., Государственный университет
управления, Институт отраслевого менеджмента, Гибадуллин А.А.*

Аннотация

Вопросы развития российского электроэнергетического комплекса в настоящее время актуализируются, в связи с мировыми трендами дальнейшего совершенствования производства и передачи электрической энергии. Одним из стратегических планов развития российской электроэнергетики является внедрение PLM-решений, как механизма перехода предприятий на инновационный путь развития, управление которым целесообразно осуществлять через поддержку жизненного цикла продукта.

На сегодняшний день в электроэнергетике наблюдаются процессы износа и устаревания оборудования, эксплуатации его за пределами нормативного срока использования, выработки электрической энергии на технологиях сжигания углеводород, которые отрицательно влияют на окружающую среду, а также на эффективность бизнес-процессов¹. В современной электроэнергетике рассматривают множество механизмов перехода на инновационный путь развития, внедрения информационных и цифровых технологий, совершенствования существующего производства и т. д. На взгляд автора статьи, одним из механизмов, позволяющих решить проблемы в электроэнергетической отрасли, является технология PLM (Product Lifecycle Management), то есть технология управления жизненным циклом изделий.

Системы класса PLM – это концепция управления жизненным циклом изделия, которая обеспечивает управления информацией об объекте и связанных с ним процессов: от производства до эксплуатации и утилизации. Подобная система в электроэнергетике не так распространена, как, например, в машиностроении, при этом, применение технологий PLM в различных отраслях российской промышленности не велика.

¹ Гибадуллин, А.А. Формирование модели повышения эффективности основных средств электроэнергетических компаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия экономика и управление. – 2018. – № 3(34). – С. 20-25.

PLM-системы получили большую известность в мировой электроэнергетике, которые обеспечивают точность и скорость обработки информации, вследствие чего увеличивается оперативность принятия решений о дальнейшей работе с тем или иным поставщиком оборудования, а также оценивать эффективность внедрения новинок и целесообразность их дальнейших закупок².

Подобная технология активно предлагается немецкой компанией «Siemens» владельцам, операторам, производителям оборудования в области энергетики, в основе которой лежит широкий спектр программных решений и лучших отраслевых практиках. Эти решения позволяют значительно упростить совместную работу участников цепочки поставок на этапах проектирования, строительства, технического обслуживания и вывода из эксплуатации оборудования. Решения компанией «Siemens» по управлению жизненным циклом изделия включает интегрированное управление требованиями и защищенную систему совместной работы с поставщиками, основанную на многопрофильной платформе по управлению разработкой, которая объединяет данные о механических, электронных, программных компонентах и данные численного моделирования в единой среде³.

Таким образом, в электроэнергетике РФ наблюдаются различные тенденции ее развития. Наряду с ней совершенствуются и технологии, которые позволяют достигать качественно нового уровня в производстве, передачи, распределения и сбыте электрической энергии. Подобными технологиями может стать система класса PML, которая будет способствовать основой для дальнейших исследований и разработок в сфере энергетики

² Сайт компании Борлас. – URL: https://borlas.ru/press_422.html

³ Сайт компании Siemens PLM. – URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/industries/energy-utilities>

ТЕХНОЛОГИИ АККУМУЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИМЕРЕ КОМПАНИИ ALACAES

*М.А. Иванова – студент, Государственный университет управления,
Институт отраслевого менеджмента, Управление в энергетике*

*А.А. Созонтов – студент, Государственный университет управления,
Институт отраслевого менеджмента, Управление в энергетике*

*Научный руководитель – к.э.н., Государственный университет
управления, Институт отраслевого менеджмента, Гибадуллин А.А.*

Аннотация

В мире существуют тренды, связанные с увеличением доли использования возобновляемых источников энергии. Для развития возобновляемой энергетики необходимо удешевление технологий, а также создание технологий аккумуляции электроэнергии. Одной из перспективных технологий хранения энергии можно считать использование сжатого воздуха, применяемого компанией ALACAES. Преимуществами данного метода является сочетание низких затрат, высокого КПД и экологичность процесса, в результате чего данная технология становится перспективной для использования в местах децентрализованного энергоснабжения.

К 2040 году доля альтернативных источников энергии в мировом балансе будет повышаться, однако большую часть рынка продолжают занимать углеводороды. Но для энергетического баланса это является безоговорочным плюсом, так как всё это приведет к манипуляции рынка углеродной энергетики и снижению на нем конкуренции. Одновременно, рост неуглеродной энергетики поспособствует диверсификации энергобаланса и повышению уровня рыночной конкуренции.

Для современной энергетики характерна эпоха трех «Д» (Energy Transition):

1. Децентрализация – это развитие малой генерации и размещение электростанций вблизи конечного потребителя;
2. Диджитализация – это использование в энергетике постоянно дешевеющих цифровых технологий;
3. Декарбонизация – это стремление найти возможности для предотвращения изменения климата за счет использования неуглеродной генерации, таких, как, например, возобновляемых источников энергии, атомной энергетики, нетрадиционных видов получения электрической энергии и др.

Таким образом, целью статьи является поиск новых технологий развития электроэнергетики. Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие тренды развития электроэнергетики;
- сформировать новые технологии развития электроэнергетики.

В рамках исследования используются сравнительные, социально-экономические, технико-экономические и логические методы, а также методы причинно-следственной связи.

На сегодняшний день электроэнергетика переживает свое «перерождение», которое связано с развитием новых видов деятельности, переходом на новые и цифровые технологии, модернизацией и обновлением производственных мощностей и т.п.¹ Подобные тренды, в первую очередь, связаны с тем, что растут потребительские предпочтения и спрос на электрическую энергию, во-вторых, изменяется мировая повестка, в-третьих, с появлением все более экономичных производств и т.д.² Самое быстрое развитие энергетики наблюдается на Западе, так как их экономическая политика направлена на экономное и безопасное использование ресурсов, и сохранение окружающей среды для будущих поколений.

Российская Федерация стремится отвечать современным трендам развития энергетики, однако процессы модернизации и обновления ведутся не на достаточном уровне, но при этом, на отдельных территориях наблюдается развитие магистральных и распределительных сетей, водоснабжения и отопления. Это связано с тем, что население стремится перейти на самостоятельное обеспечение.

Процесс децентрализации неизбежен, так как для потребителей снижаются затраты на потребление электрической энергии и повышается надежность и бесперебойность электроснабжения, чем, например, потребление из централизованных магистралей. Высокие тарифы в сетях обусловлены тем, что сети и системы морально и физически изношены, и это требует дополнительных

¹ Воронцов В.Б., Толмачева А.А. Оценка устойчивости энергетической системы // Реформы в России и проблемы управления – 2017 Материалы 32-й Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2017. С. 200-202.

² Гибадуллин А.А. Формирование модели повышения эффективности основных средств электроэнергетических компаний // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия экономика и управления. – 2018. – № 3(34). – С. 20-25.

затрат на их содержание³. В итоге, для повышения качества электроснабжения необходимо вводить новые технологии в электроэнергетику, которые будут регулировать нагрузку, повысят эффективность крупных станций и обеспечат контроль локальных сетей.

Таким образом, можно сформировать факторы, влияющие на развитие новых технологий в электроэнергетике:

1. Объем потребления тепловой и электроэнергии, который постоянно растет;
2. Децентрализация структуры потребления;
3. Топливная политика, которая подразумевает отказ от угля, газа, атомной энергии и переход на возобновляемые источники энергии
4. Автоматизация систем управления и мониторинга
5. Аккумуляция электроэнергии⁴.

Исходя из этих факторов, можно сделать вывод, что наблюдается развитие комбинированной системы централизованного и децентрализованного энергоснабжения. В ближайшем будущем люди начнут отказываться от традиционных источников энергии, и будут использоваться более продуктивные источники.

На наш взгляд, одним из перспективных направлений развития электроэнергетики является хранение энергии. Ее значение растет с развитием возобновляемых источников энергии. В последние годы появляются возможности для аккумуляции энергии от источников энергии. Следует отметить, что на стадию «предкоммерческого» использования уже выходят новые и перспективные решения, но только в развитых странах.

Так как ВИЭ-генерация, солнечные и ветряные фермы напрямую зависят от природных факторов, то их выработка постоянно колеблется. Решить эту проблему удастся за счет создания новых технологий хранения электроэнергии. На сегодняшний день специалисты среди технологии накопления энергии выделяют такие как сжиженный воздух, расплавленная соль, окислительно-восстановительные проточные батареи и т.п., кроме этого выделяют более традиционные гидроаккумулирующие электростанции и аккумуляторы, которые будут работать по принципу батарей в смартфонах и ноутбуках.

³ Гибадуллин А.А., Ерыгин Ю.В. Формирование модели обеспечения устойчивости электроэнергетического комплекса // Вестник СибАДИ. – 2018. – № 4. – Т. 15. – С. 618-628.

⁴ Сайт RUSBASE. – URL: <https://rb.ru/longread/without-oil/>

Хранение электроэнергии в виде сжатого воздуха заключается в его закачивании под давлением в специальные резервуары (например, в подземные полости). Этот способ усовершенствовала швейцарская компания ALACAES, разработав технологию, которая позволяет заполнять воздухом, охлажденным до жидкого состояния, полости в горных породах. Это позволяет увеличить энергоемкость и эффективность хранения электроэнергии. В этом направлении также работает лаборатория Alphabet X. Для хранения энергии они рассматривают расплавы солей и антифриза. По мнению специалистов, эта технология должна позволить гораздо дольше хранить излишки солнечной энергии и энергии ветра.

В 2016 г. компания ALACAES начала тестирование новой системы хранения энергии за счет использования сжатого воздуха (AA-CAES). Пилотная станция построена в Швейцарских Альпах, в которой в качестве зоны давления используется транспортный туннель, для его уплотнения используются две 5-метровые конические бетонные пробки (рисунок).

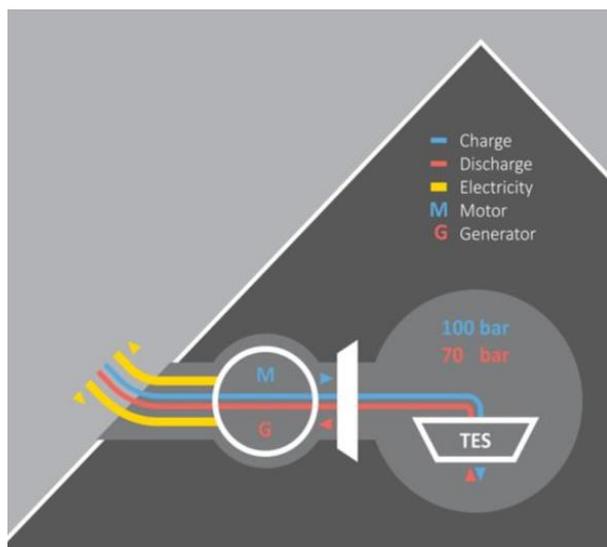


Рисунок 1. Принцип работы системы хранения электроэнергии за счет использования сжатого воздуха компании ALACAES⁵

Во время активной работы ВИЭ часть электроэнергии подается на мотор аккумулирующей станции. Мотор приводит в действие компрессор, который нагнетает воздух в хранилище. Под высоким давлением воздух нагревается, но, проходя через систему теплового хранения, охлаждается и складывается в виде сжатого воздуха. Когда необходима передача дополнительной энергии в сеть, а

⁵ Сайт ALACAES. – URL: <https://alacaes.com/technology/pilot-plant/>

ВИЭ не может ее предоставить, то открывается регулирующий клапан, сжатый воздух снова проходит через термальное хранилище, нагревается и поступает на лопатки турбины.

Особенности технологии:

1. Низкие капиталовложения на 1 кВт*ч хранения энергии;
2. Нулевые выбросы в окружающую среду;
3. Использование запатентованной технологии хранения тепловой энергии;
4. Обеспечение хранения больших объемов электроэнергии;
5. КПД более 72%.

Хранение электроэнергии для стабилизации сети необходимо в случае, если доля ВИЭ в структуре генерации будет расти. Описанная технология предполагает использование избыточной электроэнергии из сети для сжатия воздуха с использованием адиабатических компрессоров. Особенностью технологии ALACAES является то, что хранилище тепловой энергии размещается внутри гораздо большей камеры давления, чем обычная горная или подземная пещера. Поэтому хранилище тепловой энергии, находясь в самой зоне давления, не должно выдерживать никакого давления. Это значительно снижает стоимость и сложность установки хранилища, что дает технологии ALACAES экономическое преимущество над другими технологиями хранения.

Таким образом, технология аккумуляции энергии – это один из ключевых моментов широкого распространения ВИЭ. Внедрение разработанной компанией ALACAES системы хранения энергии в зоне децентрализованной энергетики совместно с ВИЭ может стать серьезным шагом к технологическому прорыву альтернативной энергетики и переходу всей электроэнергетики на новый путь развития.

ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики»

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ:
ЗАДАЧИ, ПРОБЛЕМЫ, РЕШЕНИЯ**

**СБОРНИК ТРУДОВ II ВСЕРОССИЙСКОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
НАУЧНЫХ, НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИХ РАБОТНИКОВ,
АСПИРАНТОВ И СТУДЕНТОВ**

Центр оперативной полиграфии «Violitprint»
Усл.п.л. 6,1 Тираж 500 экз. Заказ №4539