

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК 621.317.384:621.316.06

**А.Р. Айдарова, Ч.М. Бузурманкулова, А.Б. Калмурзаев,
Н.А. Суюнтбекова**

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
aidarova_2010@mail.ru, buzurmankulova79@mail.ru, apsi_kg@mail.ru

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

В статье предложено описание экспериментальной установки с возможностью управления работой электроприемников (ЭП) в различных режимах работы нейтрали электросети. Такая возможность позволяет оценивать влияние режимов работы на потери электроэнергии с помощью физической модели элементов электросети. Кроме того, рассмотрен способ измерения потерь электроэнергии в таких элементах сети. Дано обоснование возможности использования диода для модельного представления воздушного промежутка (фаза – земля) при возникновении замыкания поврежденной фазы с землей в сетях с изолированной нейтралью. В качестве примера рассмотрено решение задачи по моделированию групповой электрической нагрузки, в соответствии с которым программно управляются (подключаются или отключаются) ЭП с применением функционального модуля КАМАК. Исходными данными для моделирования индивидуальных графиков ЭП и группового как суммы индивидуальных являются: количество ЭП; номинальные мощности этих ЭП; минимальные и максимальные длительности непрерывной работы каждого ЭП между паузами и законы распределения этих случайных величин; минимальные и максимальные длительности пауз ЭП и законы их распределения; общая длительность моделирования. Приведена блок-схема моделирующего алгоритма.

Ключевые слова: потери мощности; качество электроэнергии; система электроснабжения; экспериментальная установка с элементами АСНИ

Введение. В процессе передачи электрической энергии по электрическим сетям неизбежны ее потери, которые приводят к дополнительному расходованию энергоресурсов на электростанциях.

Поэтому, несмотря на то, что основные факторы, определяющие потери в электрических сетях, хорошо известны и исследованы, необходимы тщательные анализы всех составляющих потерь и причин их появления.

Использование новых многофункциональных средств моделирования и измерения параметров электрических режимов позволит глубже исследовать влияние дополнительных факторов, которыми ранее при анализе пренебрегали.

К числу дополнительных и малоисследованных факторов относится низкое качество электроэнергии и в первую очередь хаотические составляющие токов и напряжений, а также их несинусоидальность и несимметрия. Это в первую очередь связано с увеличением количества и повышением установленной мощности электроприемников с нелинейным и несимметричным характером нагрузок.

В настоящее время нет достаточно обоснованных рекомендаций по проведению качественного анализа режимов и потерь электроэнергии [1-3]. Поэтому исследовательские работы, связанные с решением выше отмеченной проблемы, и разработка инструментария для экспериментального исследования (для исследования влияния дополнительных и малоисследованных факторов на потери) являются актуальными и имеют несомненно теоретический и практический интерес.

Постановка задачи. В электрических сетях, где показатели качества электрической энергии не находятся в установленных стандартом границах, необходимы дополнительные исследования, направленные на уточнение степени влияния на потери таких явлений, как накладывающиеся на гармонические процессы хаотические колебания при присутствии интергармонических составляющих [2].

Проведение дополнительных исследований более рационально на экспериментальных установках, где у исследователя есть возможность управления режимами работы ЭП и качеством электроэнергии (РРЭП и КЭ), что позволяет оценивать влияние РРЭП и КЭ на потери электроэнергии с помощью физической модели элементов электросети, тогда как при натурных испытаниях у исследователя ограничены возможности по варьированию разными факторами, влияющими на РРЭП и КЭ, из-за невозможности вмешиваться в технологические процессы производства.

Существующие способы измерения технических потерь основаны на измерении входящей в элемент сети электроэнергии, а также отходящих от него ее значений. При этом разность этих энергий определяет значение искомой потери. Однако используемые приборы калиброваны при чисто синусоидальном токе и напряжении [4], поэтому такой способ дает большую погрешность.

Микропроцессорные системы имеют свои недостатки, которые связаны с дискретизацией входного сигнала, когда входной сигнал относится к нестационарным случайным процессам, тогда возможны ошибки маскировки частот [5].

В статье поставлена задача разработки лабораторной установки (ЛУ) с элементами автоматизированной системы научных исследований (АСНИ), с помощью которой изучалось бы влияние РРЭП и КЭ на потери электроэнергии на физических моделях элементов электрической сети с применением измерительного прибора, основанного на калориметрическом способе измерения. Разработанная лабораторная установка с элементами АСНИ является дальнейшим развитием идеи, заложенной в работе [6].

Результаты разработки. Разработанная экспериментальная установка (ЭУ) (рис.1) позволяет исследовать РРЭП и КЭ на потери в элементах сети, которые представлены своими физическими моделями.

ЭУ представлено: 1 – физическая модель электрической сети (ФМЭС) и 2 – устройства для автоматического управления экспериментом (АУЭ).

ФМЭС и АУЭ состоят из следующих элементов: трехфазный источник электрической энергии с фазными напряжениями соответственно e_a, e_b, e_c ; К – калориметр, содержащий физическую модель исследуемого элемента сети (рис.2); РИТ – регулируемый измерительный трансформатор тока, обеспечивающий контроль режима работы сети; C_{ab}, C_{ac}, C_{bc} – межфазные емкости линии электропередачи; C_a, C_b, C_c – регулируемые конденсаторы, имитирующие емкости фаз сети относительно

земли. Возможность регулирования значения этих конденсаторов позволяет моделировать работу электрической сети в горных условиях, когда каждая из фаз воздушной линии может иметь различное расстояние по отношению к земле. Электрические нагрузки представлены линейными (Z_a, Z_b, Z_c) и нелинейными (Z_a^H, Z_b^H, Z_c^H) резисторами соответственно. Качество электроэнергии в исследуемой сети регулируется подключением или отключением нелинейных резисторов. Отключения или включения резисторов осуществляются программным способом с помощью реле через РУР (регистр управления реле). Алгоритм управления соответствует графику электрических нагрузок, который предварительно моделируется в соответствии с вероятностными или детерминированными законами включения или отключения ЭП. В качестве уточнения поясним на примере, что означает «вероятностный или детерминированный закон включения или отключения ЭП»: например, если ЭП является сварочным аппаратом, то продолжительность

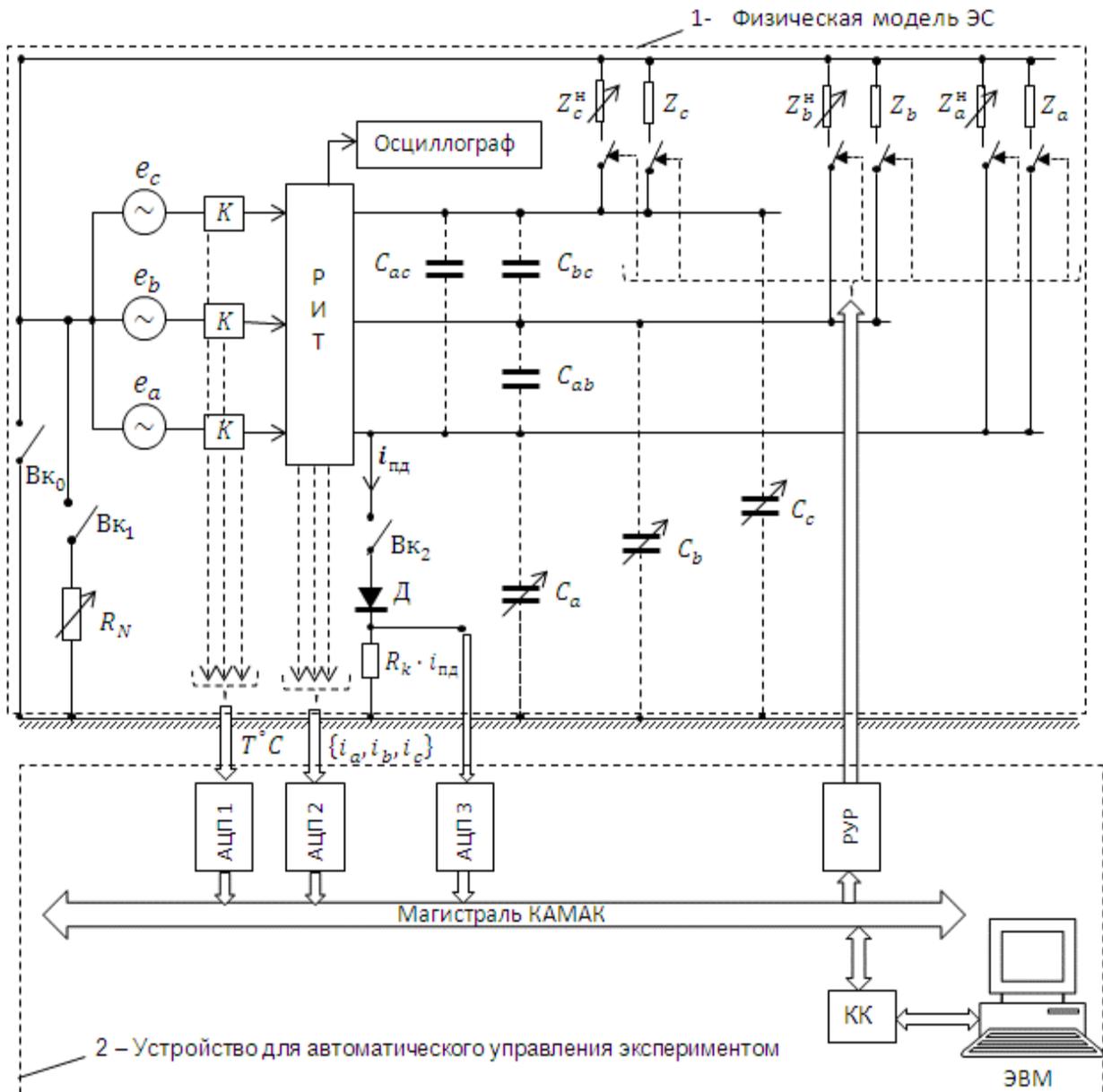


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки с элементами АСНИ

горения или негорения электрической дуги подчиняется вероятностному закону, закон которого задается плотностью распределения продолжительности существования или отсутствия электрической дуги, кроме того, этот процесс сильно нелинейное; если, например, ЭП – светильник с люминесцентными лампами, который надо отключить после окончания рабочей смены, то этот процесс детерминирован, т.е. время отключения заранее известно.

Заметим, что в процессе работы ЭП в стохастическом режиме также изменяется и степень симметричности сети.

Изменяя состояния элементов ЛУ – $Вк_0$ и $Вк_1$, т.е. выключателей, экспериментатор может менять тип электрической сети (ЭС). При их разомкнутых состояниях нейтраль ЭС изолирована. При разомкнутом $Вк_0$ и замкнутом $Вк_1$ нейтраль ЭС заземлена через низкоомный или высокоомный резистор R_N в зависимости от его значения. При замкнутом $Вк_0$ и разомкнутом $Вк_1$ нейтраль ЭС глухо заземлена. Разомкнув контакты $Вк_0$, $Вк_1$ и замкнув $Вк_2$, моделируем работу сети с изолированной нейтралью при замыкании одной фазы на землю. D – диод, его наличие означает появление перемежающейся электрической дуги между фазой А и землей, т.е. является моделью дугового промежутка. Обоснование этого положения дано ниже по тексту. Замыкание без него означает возникновение металлического замыкания. R_k – калиброванный резистор, падение напряжения от протекающего через него тока $i_{пд}$ позволяет изучить закон изменения этого тока, вызванного возникновением перемежающейся электрической дуги.

Описание основных элементов ФМЭС: 1. Калориметр – измерительный прибор потери электроэнергии. Следует отметить, что этот прибор (рис.2) в нашей установке предназначен для проведения исследований, где оценивается степень влияния на потери в элементах сети от тока с искаженной синусоидой. Элемент сети представлен физической моделью и содержится внутри калориметра.

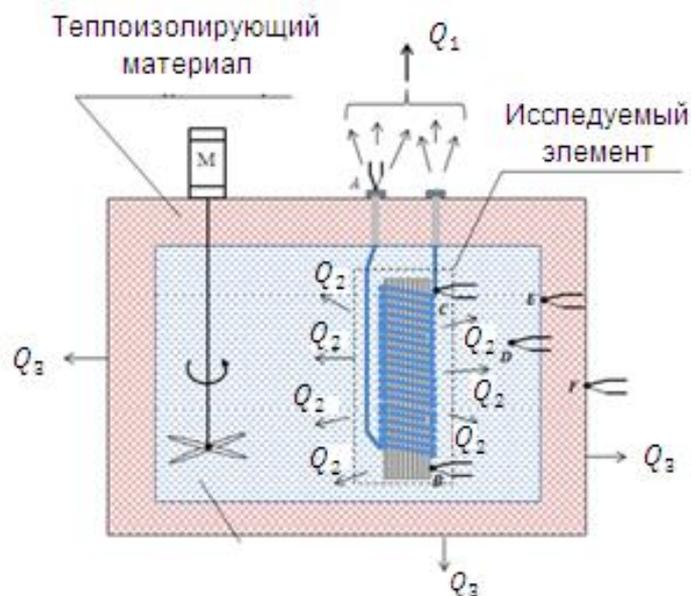


Рисунок 2 – Калориметр с моделью элемента сети

Рассматриваемый способ основывается на следующей идее [7]. Исследуемый элемент электрической сети в виде физической модели помещается в теплоизолированную емкость заданного объема, которая заполнена диэлектрической жидкостью с заданными теплофизическими характеристиками и начальной температурой.

При протекании электрического тока через исследуемый элемент в течение определенного времени в нем за счет потери электроэнергии выделяется тепло, которое поглощается жидкостью, нагревая ее до определенной температуры.

Так как нам известны продолжительность эксперимента, начальная и конечная температуры, теплофизические характеристики и масса жидкости, а также масса физической модели элемента и его теплофизические характеристики, то можно рассчитать потери электроэнергии в физической модели. Все необходимые расчетные формулы для определения потери электроэнергии в физической модели приведены в [7]. Следует отметить, что такой способ применим только при проведении научных исследований.

1. Датчик тока в виде регулируемого измерительного трансформатора – РИТ [8]. Выше по тексту отмечено, что он обеспечивает контроль режима работы сети в процессе эксперимента. РИТ (рис.3) конструктивно представляет собой сердечник 1 цилиндрической

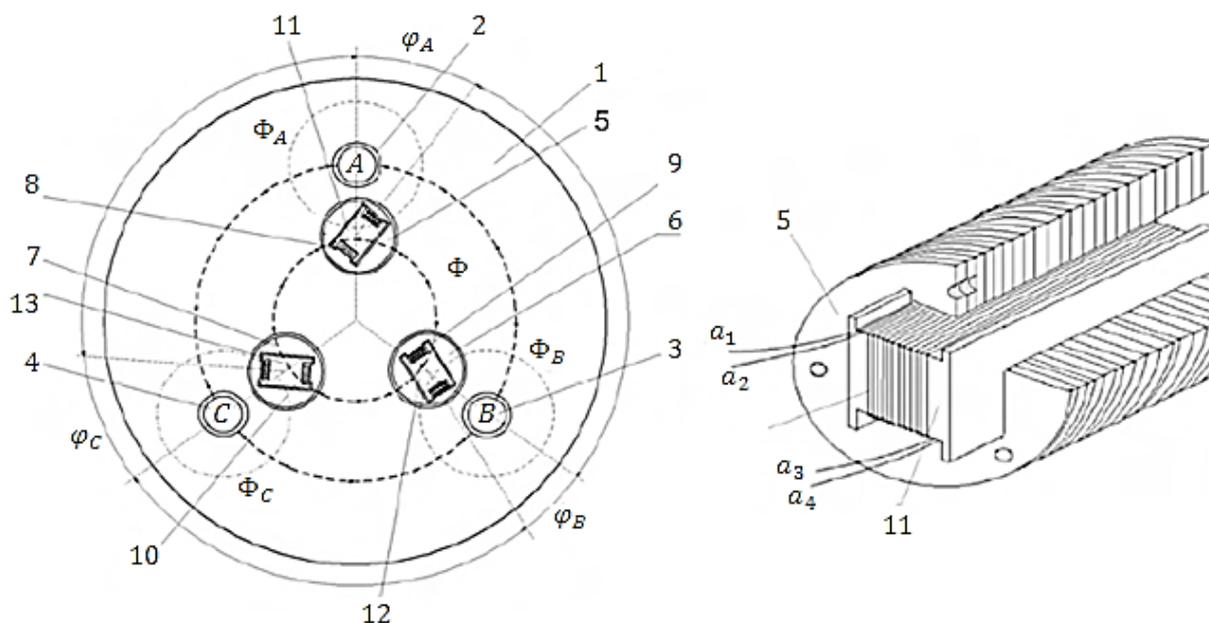


Рисунок 3 – Конструкция РИТ

формы из соответствующего магнитного материала. В сердечнике просверлены отверстия, которые по отношению друг к другу расположены под углом в 120° . Элементы с номерами 2, 3, 4 представляют проходные изоляторы с токоведущими стержнями фаз А, В, С, которые являются первичными обмотками. Магнитные потоки Φ_A , Φ_B , Φ_C образованы этими обмотками. Внутренние отверстия 5, 6, 7 цилиндрической формы расположены напротив соответствующих проходных изоляторов 2, 3, 4. Обмотки 8, 9, 10 намотаны на рамки 11, 12, 13 и установлены в

расточке внутренних отверстий 5, 6, 7 соответственно напротив фаз А, В, С. Ориентации фаз таковы, что плоскости этих рамок расположены в зоне результирующего вращающегося магнитного поля Φ , полученного от токов нагрузок I_A, I_B, I_C , протекающих по первичным обмоткам устройства.

2. Диод.

Обоснование возможности использования диода для модельного представления воздушного промежутка (фаза - земля) при возникновении замыкания повреждённой фазы с землей.

В работе [9] изложено, как возникает пробой воздушного промежутка в неоднородном поле, образованном между электродами «острие –плоскость». В нашем случае «острие» соответствует фазе воздушной линии, а «плоскость» – земле.

В воздушной линии, когда возникает условие начала электрического разряда между фазой и землей, ионизационные процессы начинаются у электрода – острия, так как там напряженность электрического поля наибольшая. При этом возникает определенное количество свободных электронов и положительных ионов в результате ударной ионизации. Явление имеет место, когда налетающая на атом (молекулу) другая атомная частица (свободные электроны, изначально возникающие в атмосфере за счет взаимодействия молекул воздуха с внешними энергетическими излучениями) сообщает валентному электрону энергию $\delta W \geq q \cdot U_{и}$. Описанный выше процесс можно записать так: $A + \vec{e} = A^+ + \vec{e} + \vec{e}$.

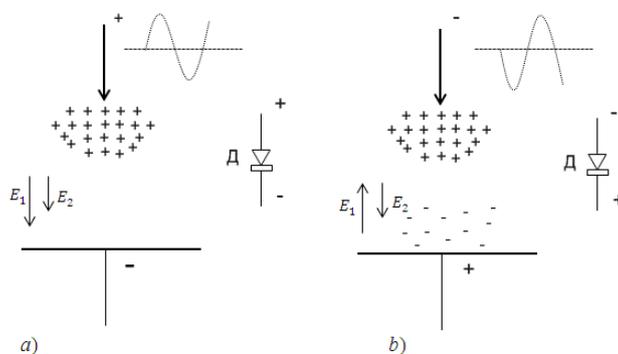


Рисунок 4 – Модельное представление воздушного промежутка (фаза – земля) в виде диода Д, когда произошло замыкание фазы с землей из-за повреждения фазы

Характер распределения частиц A^+ и \vec{e} в промежутке между электродами зависит от соотношения их масс. Так как масса ионов A^+ намного больше массы электронов \vec{e} , то для случая, когда электрод – острие положительной полярности (рис.4, а), электроны из-за ничтожной инерционности быстро перемещаются в его сторону и там нейтрализуются. В результате в области электрода - острия образуется положительный объемный заряд, который усиливает поле во внешней области и тем самым способствует развитию разряда. Ослабление поля получается при отрицательной полярности электрода-острия (рис.4, б). Поэтому напряжение пробоя при положительной полярности электрода-острия меньше, чем при отрицательной его полярности, что подтверждено в работе [9]. Вследствие этого дуговой промежуток можно заменить диодом, имеющим нелинейную вольтамперную характеристику.

Структура устройства для автоматического управления экспериментом – АУЭ

1. ЭВМ в виде персонального компьютера (ПК), в оперативную память которого загружена управляющая программа, соответствующая задаче исследования; устройство сопряжения ПК с ФМЭС в виде аппаратуры КАМАК, предназначенное для обмена информацией между измерительной аппаратурой, используемой в эксперименте, и ЭВМ; 2. АЦП1 – многоканальный помехозащищённый аналого-цифровой преобразователь в виде функционального модуля КАМАК, который преобразует аналоговые сигналы в виде напряжений, поступающих от термодатчиков, находящихся в калориметре; 3. АЦП2 – многоканальный помехозащищённый аналого-цифровой преобразователь в виде функционального модуля КАМАК, который преобразует аналоговые сигналы в виде напряжений, поступающих от РМИТ; 4. АЦП3 – одноканальный аналого-цифровой преобразователь в виде функционального модуля КАМАК, который преобразует сигнал в виде напряжения, поступающего от калиброванного резистора в цифровой. По этому сигналу мы изучаем закон изменения тока $i_{нд}$; 5. РУР – регистры управления реле в виде функционального модуля, предназначенные для подачи управляющих сигналов к реле, которое своими контактами включает или отключает нагрузки в виде резисторов ($Z_a, Z_a^H, Z_b, Z_b^H, Z_c, Z_c^H$); 6. КК – предназначено для согласования стандартов информации между системой КАМАК и вычислительной машиной.

Управляющая программа написана на языке TURBO Pascal с использованием процедур для работы с модулями КАМАК (версия 01.12.97) через контроллер крейта КК009М.

В качестве примера рассмотрим одну из возможностей ЛУ по моделированию групповой электрической нагрузки (рис.5), в соответствии с которым программно управляются (подключаются или отключаются) нагрузки (Z_a, Z_b, Z_c), (Z_a^H, Z_b^H, Z_c^H) с применением РУР функционального модуля КАМАК.

Исходными данными для моделирования индивидуальных графиков нагрузки и группового как суммы индивидуальных являются: количество ЭП – N; номинальные мощности этих ЭП P_k ($k = 1 \div N$); минимальные и максимальные длительности непрерывной работы каждого ЭП между паузами и законы распределения этих случайных величин; минимальные и максимальные длительности пауз ЭП и законы их распределения; общая длительность моделирования – T.

На блок-схеме рис.5: блок 1 соответствует подпрограмме разыгрывания длительности работы I-го ЭП мощностью $P(IT)_T$ в текущий момент времени JT, а 2 – подпрограмме разыгрывания паузы этого же ЭП. Если запустим программу, написанную в соответствии с алгоритмом (рис.5), с параметрами $T = 14$ мин., $N = 28$ шт., где T – продолжительность моделирования в минутах, N – количество электроприемников, то получим результат моделирования в виде двухмерной матрицы Gt, содержание которой приведено на рис. 6.

T

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0
3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
6	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
10	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
13	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
17	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
19	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
20	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
21	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
22	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
23	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
26	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
27	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
28	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

N

Рисунок 6 – Результат имитационного моделирования

Как видно, матрица Gr состоит из нулей и единиц, нули соответствуют паузам, а единицы – включенным состояниям электроприемников. Например, на этой матрице – двенадцатая строка, имеющая следующую структуру, соответствует режиму работы

12	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

12-го ЭП, который проработал всего 14 минут, из них вначале в течение 5 минут находился во включенном состоянии, затем 7 минут в состоянии паузы, а далее 2 минуты опять в работе. Для получения группового графика достаточно произвести следующую операцию: $P_{gp}(t) = Gr^T \cdot P$, где правая часть – произведение транспонированной матрицы и вектора. Элементами вектора P являются мощности электроприемников.

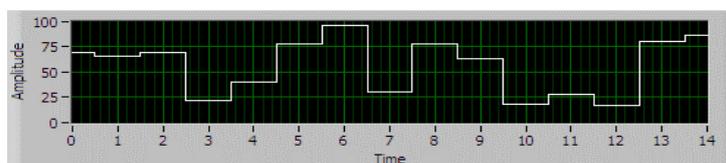


Рисунок 7 – Результат имитационного моделирования

График зависимости $P_{gp}(t)$ представлен на рис.7.

В соответствии с этим графиком осуществляется управление, т.е. включения или отключения нагрузки в виде резисторов ($Z_a, Z_a^H, Z_b, Z_b^H, Z_c, Z_c^H$). Кроме того, такие графики со стохастическим характером изменения нагрузки позволяют понять о характере аналитической взаимосвязи между вероятностными законами функционирования ЭП и потерями в питающие эти ЭП токопроводами. Такая информация имеет как практическую, так и научную ценность.

Заключение. Предложена экспериментальная установка с элементами АСНИ, имеющая возможность управления РРЭП и КЭ. Такая возможность позволяет оценивать влияние РРЭП и КЭ на потери электроэнергии с помощью физической модели элементов электросети. Кроме того, рассмотрен способ измерения потерь электроэнергии в таких элементах сети. Дано обоснование возможности использования диода для модельного представления воздушного промежутка (фаза – земля) при возникновении замыкания поврежденной фазы с землей. В качестве примера для демонстрации одной из возможностей ЛУ рассмотрено решение задачи по моделированию групповой электрической нагрузки, в соответствии с которым программно управляются (подключаются или отключаются) нагрузки с применением функционального модуля КАМАК.

Литература

1. Боровиков В.С., Харлов Н.Н. Оценка добавочных потерь активной мощности и электроэнергии в линиях с высоким коэффициентом искажения синусоидальности тока // <https://portal.tpu.ru/science/konf/eers/archive/2010/sect-1.pdf>. – С. 5–10.
2. Фёдоров В.К. Возникновение и идентификация хаотических режимов в электроэнергетических системах / В.К. Фёдоров, П.В. Рысев, Е.Ю. Свешникова, С.Ю. Прусс, Д.В. Рысев // Омский научный вестник, 2009. – №1(77). – С.117–122.
3. Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко // Электрика, 2008. – № 10. – С. 3–11.
4. Арриллага Дж. и др. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.
5. Бендатель Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.: ил.
6. Арфан Аль Хакам, Сатаркулов К.А. Компьютерное управление экспериментом в системах электроснабжения промышленных предприятий // Наука и новые технологии, 2006. – № 1. – С. 50–54.
7. Ниязов Н.Т., Усубалиева Г.К., Калматов У.А., Суюнтбекова Н.А. // Способ определения отдельных видов потерь электроэнергии в компонентах электрической сети на их физических моделях. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. – М. 2019. – С. 2765–2773.
8. Сатаркулов Т.К., Иманакунова Ж.С., Абылгазиев Ж.С., Корпобаева А.К., Айдарова А.Р., Калматов У.А. Регулируемый многофункциональный измерительный трансформатор / Патент 1791 КР. Официальный бюллетень № 10 (198). – С. 14–15.
9. Воробьев Г.А. Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. – 126 с.: ил.